De la laureatul Premiului Nobel pentru Fizică 2021

GIORGIO PARISI

UN STOL DE GRAURI

MINUNĂȚIILE SISTEMELOR COMPLEXE

„Premiul Nobel pentru Fizică acordat lui Giorgio Parisi răsplătește munca unui savant extraordinar și confirmă nivelul de excepție al școlii de fizică teoretică din Italia."

Carlo Rovelli

TREI

GIORGIO PARISI
în colaborare cu ANNA PARISI

UN STOL DE GRAURI

MINUNĂȚIILE SISTEMELOR COMPLEXE

Traducere din limba italiană
de Liviu Ornea

3
TREI



Soției mele, Daniella Ambrosino,
care mi-a stat întotdeauna alături

Un stol de grauri

Interacțiunile reprezintă o temă importantă, chiar și pentru înțelegerea unor fenomene psihologice, sociale și economice. În particular, ne-am concentrat pe felul în care fiecare membru al unui stol reușește să comunice pentru a se deplasa coerent, producând o unică entitate colectivă și multiplă.

Observarea comportamentului colectiv al animalelor e fascinantă, indiferent dacă e vorba despre stoluri de păsări, bancuri de pești ori turme de mamifere.

În amurg, putem vedea stoluri de păsări desenând imagini fantasmagorice, dansul a mii de pete negre mărunte proiectate pe un cer în culori schimbătoare. Le vedem cum se mișcă toate deodată fără să se

ciocnească unele de altele, fără să se disperseze, depășind obstacole, îndepărtându-se și apoi refăcând formația, recompunând întruna așezarea lor spațială, de parc-ar urma împreună și fiecare în parte comenzile unui dirijor. Am putea să le privim la nesfârșit — spectacolul e mereu altul, în forme noi și imposibil de prezis. Uneori însă, chiar și în fața acestei frumuseți pure, deformația profesională a omului de știință se impune și naște o mulțime de întrebări care nu-i dau pace. Chiar există un dirijor sau acest comportament colectiv se autoorganizează? Cum anume se propagă rapid informația prin întregul stol? Cum e posibil să se schimbe configurațiile atât de rapid? Cum se distribuie vitezele și accelerațiile păsărilor? Cum reușesc să vireze toate deodată fără să se ciocnească? Sunt oare de ajuns niște reguli simple pentru ca interacțiunile dintre stoluri să genereze mișcări

colective articulate și variabile ca acelea pe care le observăm pe cerul Romei?

Când ești curios și vrei să afli răspunsuri la întrebările pe care ți le-ai pus, începi să cauți: pe vremuri, în cărți, acum, pe internet. Dacă ai noroc, găsești răspunsurile, dar când nu există răspunsuri, pentru că nimeni nu le cunoaște, dacă ești *cu adevărat* curios, începi să te întrebi dacă n-ar fi cazul să găsești chiar tu răspunsul. Faptul că nu l-a găsit nimeni până acum nu te sperie, pentru că exact asta e meseria ta: să-ți imaginezi sau să faci ceva ce n-a mai făcut nimeni înainte. Dar nici nu-ți poți petrece viața încercând să deschizi porți blindate ale căror chei nu le ai. Înainte de a porni la drum, trebuie să te lămurești dacă ai competența și instrumentele care să-ți permită să sapi în adâncime; nimeni nu-ți poate garanta succesul; trebuie, metaforic vorbind, să-ți iei inima-n dinți, dar, dacă inima iese

sfâșiată, atunci mai bine te lași păgubaș.

Comportamente colective complexe

Zborul graurilor mă fascina atât de mult, pentru că era legat nu doar de firul conducător al cercetărilor mele, ci și de multe alte preocupări ale fizicii moderne: înțelegerea comportamentului unui sistem compus dintr-un număr mare de elemente (actori) care interacționează. În funcție de situație, în fizică, actorii pot fi electroni, atomi, spini, molecule; au reguli de comportare foarte simple, dar, luați laolaltă, dau naștere unui comportament colectiv mult mai complex. Începând din secolul al XIX-lea, fizica statistică încearcă să răspundă la întrebări de felul următor: de ce fierbe sau îngheață un lichid la o temperatură exactă, de ce anumite substanțe conduc curentul electric și transmit bine căldura (metalele, de exemplu), în timp ce

altele sunt izolatoare... Răspunsurile acestor întrebări au fost găsite de mult, dar pentru altele încă se caută deslușirea misterului.

În toate aceste probleme de fizică, reușim să înțelegem din punct de vedere cantitativ cum derivă comportamentul colectiv din regulile simple ale interacțiunii dintre indivizi. Miza era extinderea aplicabilității tehnicilor de mecanică statistică de la entitățile neînsuflețite la animale, bunăoară la grauri. Rezultatele ar fi fost interesante pentru etologie și biologie evoluționistă, dar, la o scară de timp mai largă, ar fi putut duce la o înțelegere mai profundă a fenomenelor economice și sociale în științele umaniste. Și aici avem un număr mare de indivizi care se influențează unul pe celălalt întâmplător. Trebuie înțeleasă legătura care există între comportamentul fiecărui individ luat

în parte și comportamentul lor colectiv.

Marele fizician american Philip Warren Anderson (premiul Nobel, 1977) a expus această idee într-un articol provocator din 1972, intitulat *More is Different*, în care susținea că o creștere a numărului de componente ale unui sistem determină o schimbare nu doar cantitativă, ci și calitativă: problema conceptuală principală pe care ar fi urmat s-o înfrunte fizica ar fi fost înțelegerea relațiilor dintre regulile microscopice și comportamentul macroscopic.

Stoluri de graure

Nu putem explica decât ce cunoaștem; în acest caz, ne lipsea o informație crucială: voiam să înțelegem deplasările stolurilor în spațiu, dar informația aceasta nu era disponibilă la acel moment. Într-adevăr, cantitatea enormă de înregistrări video și fotografii ale stolurilor care ne stă la dispoziție (la

îndemână și pe internet) era făcută dintr-un singur punct de vedere, pierzând orice informație tridimensională. Ne găseam cumva în situația prizonierilor din mitul peșterii al lui Platon care, văzând numai umbre bidimensionale proiectate pe peretele peșterii, nu puteau sesiza natura tridimensională a obiectelor.

Tocmai această dificultate îmi stârnea interesul: studiul deplasării stolurilor era un proiect complet. Cuprindea imaginarea experimentului, strângerea și analiza datelor, elaborarea unor coduri informatice pentru simulări și interpretarea rezultatelor experimentale pentru a trage concluziile.

Știam că metodele fizicii statistice, domeniul meu de cercetare dintotdeauna, vor fi indispensabile pentru reconstrucția tridimensională a traseelor stolurilor, dar ce mă atrăgea era implicarea în proiectarea

și realizarea părții experimentale. În general, noi, fizicienii teoreticieni, ne ținem departe de laboratoare și lucrăm numai cu concepte abstracte. Or, a rezolva o problemă reală presupune controlul foarte multor variabile care, în cazul acesta, mergeau de la rezoluția obiectivelor aparatelor fotografice la dispunerea optimală a mașinilor, de la capacitatea de stocare a datelor la tehnicile de analiză. Fiecare detaliu influențează decisiv reușita experimentului; când facem raționamente „la masă“, nici măcar nu bănuim câte probleme apar „pe teren“. Nu mi-a plăcut niciodată să stau prea departe de laborator.

Graurii sunt păsări extrem de interesante. Cu secole în urmă, trăiau în nordul Europei în lunile calde și iernau în Africa de Nord. Acum, din cauza încălzirii globale, au crescut temperaturile invernale, iar orașele noastre au devenit mult mai calde, fie pentru că s-au tot

mărit, fie din cauza prezenței a numeroase surse de căldură (încălzire domestică, trafic). Mulți grauri nu mai traversează Mediterana și rămân să petreacă iarna în orașele de coastă ale Italiei, printre care și Roma, unde iernile sunt mai blânde decât odinioară.

Graurii sosesc în primele zile ale lui noiembrie și pleacă pe la începutul lui martie. Sunt destul de punctuali în deplasările lor: probabil că momentul migrației nu depinde atât de mult de temperatură, cât, mai degrabă, de motive astronomice, ca durata orelor de lumină. La Roma, pentru înnoptat, găsesc arbori veșnic verzi care-i apără de vânt; ziua, nu prea au ce mânca în oraș, așa că formează grupuri mici, de circa o sută de indivizi, care pleacă după mâncare spre câmpurile de dincolo de centura orașului. Sunt animale sociabile, obișnuite să trăiască în grup: când poposesc pe un câmp, o jumătate dintre ele mănâncă în

liniște, în timp ce cealaltă jumătate se dispune la marginile câmpului și pândește eventuala apariție a vreunui prădător; când trec la următorul câmp, rolurile se inversează. Seara se întorc în oraș, la căldură, și, înainte de a se așeza pe ramurile copacilor, formează stoluri extrem de numeroase care brăzdează cerul capitalei. Oricum, sunt încă sensibile la frigul iernatic: în diminețile de după nopțile în care se simte puternic suflul înghețat al tramontanei, îi putem găsi pe mulți dintre ei înțepeniți sub copacii care nu i-au putut apăra suficient de temperaturile scăzute.

Așadar, o bună alegere a locului de dormit devine o chestiune de viață și de moarte. E foarte probabil ca acele coregrafii aeriene vesperale să reprezinte un semnal — vizibil chiar de departe — al prezenței unui loc de dormit bun pentru noapte. Ar fi ca și cum ai agita un steag enorm pentru a semnaliza ceva, un steag foarte

vizibil: am văzut eu însumi, cu ochii liberi, într-un amurg limpede de iarnă, evoluțiile stolurilor la vreo zece kilometri de mine; erau mici pete cenușii care se mișcau asemenea unor amibe pe fundalul unui cer care încă avea, puțin deasupra liniei orizontului, o fâșie îngustă de un alb luminos. Primele grupuri mici care se întorc de pe câmp încep să danseze, iar dansul devine din ce în ce mai frenetic pe măsură ce scade lumina. Treptat, sosesc și cei rămași în urmă, astfel că, încet, se formează stoluri de mii și mii de indivizi care, cam la o jumătate de oră după apus, când lumina dispare, se năpustesc asupra copacilor aleși ca loc de înnoptare, care-i înghit ca o dolină.

Adeseori, pe lângă grauri își face apariția șoimul călător, în căutarea cinei; dacă nu suntem cu luare-aminte, trece neobservat: atenția ne este concentrată asupra graurilor, iar șoimul e remarcat numai de cei care-l caută în mod special. Chiar dacă

șoimul călător e un prădător cu o deschidere a aripilor de un metru — care poate ajunge în picaj la o viteză de peste două sute de kilometri pe oră —, graurii nu sunt o pradă ușoară. O ciocnire în zbor cu un graur îi poate provoca șoimului o fractură a aripilor lui fragile, incident mortal fără niciun dubiu. În consecință, șoimul nu îndrăznește să intre în stol, ci încearcă să prindă exemplare de la margini. Graurii reacționează la atacul șoimului, înghesuindu-se unii într-alții, strângând rândurile și schimbându-și rapid direcția ca să poată scăpa de ghearele fatale. Unele dintre cele mai spectaculoase evoluții ale graurilor sunt cauzate tocmai de încercările lor de a evita atacurile repetate ale șoimului călător, care e nevoit să exerseze serios înainte de a obține o pradă. E posibil ca multe comportamente ale graurilor să fie motivate de necesitatea de a supraviețui acestor teribile atacuri.

Experimentul

Să revenim la proiectul nostru. Prima dificultate era obținerea unei imagini tridimensionale a stolului și a formei sale pentru ca apoi, combinând mai multe imagini succesive, să reconstruim o filmare în 3D. În teorie, părea ușor și problema se putea rezolva simplu: toată lumea știe că pentru a vedea 3D e suficient să folosești doi ochi. Când privești în același timp din două puncte diferite — chiar dacă apropiate, cum sunt ochii noștri —, creierul are posibilitatea să „calculeze" distanța la care se află un obiect și deci să construiască imagini tridimensionale. Cu un singur ochi, pierdem profunzimea imaginii. Vă puteți convinge ușor închizând un ochi și încercând să luați cu mâna un obiect din fața voastră: mâna îl va căuta mai departe sau mai aproape decât se află el în realitate. Iar dacă încercați să jucați tenis sau ping-pong cu un ochi acoperit, atunci

aveți asigurată înfrângerea. Totuși, sistemul funcționează bine doar dacă suntem în stare să identificăm pasărea din aparatul de fotografiat din stânga cu cea din aparatul de fotografiat din dreapta, operație care se poate transforma într-un coșmar când în ambele fotografii sunt mii de păsări.

Era clar că nu aveam să ne plictisim. În studiile prezente în literatura științifică existau câteva reconstituiri fotografice 3D cu cel mult douăzeci de animale; identificarea se făcuse manual. Or, noi voiam să reconstituim multe fotografii, fiecare având câteva mii de păsări. Evident, nu se putea lucra manual și trebuia să folosim calculatorul pentru identificare.

Să te apuci de o problemă înainte de a fi pregătit cum se cuvine e o invitație la dezastru. Am format un grup din care făceau parte fizicieni (în afară de mine, profesorul meu, Nicola Cabibbo, și doi dintre cei mai

buni elevi ai mei, Andrea Cavagna și Irene Giardina) și doi ornitologi (Enrico Alleva și Claudio Carere). În 2004, alături de regretatul economist Marcello de Cecco și de alte grupuri europene, am depus o cerere de finanțare la Comunitatea Europeană, care ne-a fost acceptată: începeam lucrul, puteam implica masteranzi și doctoranzi, puteam cumpăra aparatura.

Ne-am plasat aparatele de fotografiat pe acoperișul Palatului Massimo, sediul minunatului Muzeu Național Roman, care străjuiește piața Gării Termini, aleasă în acei ani (primele date au fost culese între decembrie 2005 și februarie 2006) de stoluri ca unul dintre locurile de înnoptat cele mai aglomerate. Am folosit aparate de fotografiat comerciale din gama cea mai înaltă, pentru că telecamerele aveau încă o definiție prea mică. Două aparate de fotografiat la douăzeci și cinci de metri distanță unul de celălalt

garantau determinarea poziției relative a doi grauri aflați la câteva sute de metri de noi cu o precizie spațială de circa zece centimetri, precizie suficientă pentru a distinge acei grauri care zboară la circa un metru unul de celălalt. Am adăugat un al treilea aparat de fotografiat, la mică distanță de celelalte două, care ne folosea când păsările se suprapuneau în unul dintre primele două: acest al treilea aparat a fost esențial în cazurile în care reconstrucția era deosebit de dificilă.

Cele trei aparate declanșau simultan, cu o precizie de o milisecundă (a trebuit să construim un dispozitiv electronic de comandă destul de simplu), de cinci ori pe secundă. În realitate, în toate dispunerile aveam câte două aparate legate între ele care declanșau alternativ, astfel că dublam frecvența imaginilor: de fapt, luam zece imagini pe secundă. Foloseam

aparate de fotografiat, dar, până la urmă, obțineam filmulețe.

Las deoparte toate problemele tehnice privind alinierea aparatelor (rezolvată folosind ața unei undițe), focalizarea și calibrarea, stocarea rapidă a unor cantități enorme de megabiți de informație... Am reușit până la urmă și mulțumită tenacității lui Andrea Cavagna, căruia îi cedasem bucuros sarcina de a conduce operațiunile: cu siguranță, e un organizator mai bun decât mine, care aveam și multe alte sarcini.

Sigur că nu aveam doar de realizat filme 3D — operațiune deja complicată din punct de vedere tehnic —, ci trebuia să reconstruim pozițiile tridimensionale. Cu filmele 3D din sălile de cinema, operația e foarte la îndemână: fiecare ochi vede ce a filmat unul dintre aparate, apoi creierul nostru, selecționat în urma unei evoluții de milioane de ani, e perfect capabil să ajungă la o viziune tridimensională localizând obiectele

pe care le vede în spațiu. Noi aveam în față o sarcină similară folosind algoritmi de calculator, aceasta fiind a doua parte a provocării. Ne-am epuizat întregul repertoriu de analiză statistică, de probabilități, de algoritmi matematici sofisticați. Luni la rând ne-am temut că nu-i dăm de capăt: te arunci uneori peste o problemă prea dificilă și ești nevoit să dai înapoi cu coada-ntre picioare (n-ai cum să știi dinainte). Din fericire, după multă muncă și inventându-ne instrumentele matematice indispensabile, am găsit trucurile necesare ca să rezolvăm pe rând toate dificultățile și, la un an de la primele fotografii reușite, aveam și primele imagini reconstituite tridimensional.

Studiul zborului

Chiar dacă studiul comportamentului graurilor este, evident, treaba biologului, studiul cantitativ al mișcării tridimensionale

a indivizilor presupune o analiză care nu poate fi făcută decât de fizicieni. Analiza concomitentă a mii de păsări, pe sute de fotografii, pentru a reconstrui traiectoriile individuale în spațiu și timp e o activitate tipică pentru meseria noastră. Tehnicile potrivite pentru o asemenea analiză au multe puncte comune cu acelea dezvoltate pentru rezolvarea problemelor de fizică statistică sau pentru a analiza cantități mari de date experimentale.

După aproape doi ani de lucru, eram singurii din lume care aveau imagini tridimensionale ale unor stoluri de grauri. Chiar și numai observându-le am învățat o mulțime de lucruri. Când privim stolurile cu ochiul liber, de pe pământ, unul dintre lucrurile cele mai impresionante este viteza cu care-și schimbă forma; e dificil de explicat cuiva care n-a văzut așa ceva niciodată: pe cer, se mișcă obiecte de varii forme care, dintr-odată, devin

mai mici, mai înghesuite, apoi brusc se lărgesc din nou, se schimbă, devin aproape invizibile, apoi, mai întunecate. E o variație enormă atât în formă, cât și în densitate.

Multe simulări ale zborului, în care se încerca reproducerea pe calculator a acestui comportament, plecau de la stoluri care erau în mod esențial sferice. Totuși, primele fotografii tridimensionale ne-au arătat că un stol seamănă mai degrabă cu un disc. Tocmai din acest motiv vedem că forma se schimbă rapid: în funcție de direcția din care e observat, un obiect în formă de disc poate deveni foarte mare și rotund, dacă este văzut de sus, sau mult mai îngust, dacă e văzut dintr-o parte. Variația aceasta enormă în formă și densitate rezultă deci ca efect tridimensional al schimbării de orientare a stolului față de noi (explicație avansată de Nicola Cabibbo încă înainte de a face experimentul, dar fără datele

observaționale nu puteam demonstra că intuiția era corectă).

Am fost însă extrem de surprinși să descoperim că densitatea la margine e mai mare cu aproape 30% decât densitatea la centru. Graurii sunt mai adunați în apropierea marginii decât la centru: cam ca în autobuzele aglomerate în care, uneori, e mai multă lume lângă uși, unde se acumulează persoanele care abia au urcat, cele care vor să coboare și cele care vor să rămână în autobuz. Dacă asemănăm în mod naiv păsările dintr-un stol cu particule care se atrag, ne așteptăm ca densitatea să fie mai mare la centru și să scadă la margine; dar e pe dos. Stolurile au și margini foarte nete: rar se întâmplă ca o pasăre să se îndepărteze de grup. Cu mare probabilitate, acest comportament are origine biologică, provine din nevoia de a se apăra de atacurile șoimilor călători. O pasăre izolată e o pradă ușoară și cu cât păsările de la margine sunt mai

aproape una de alta, cu atât mai greu îi e șoimului să le prindă; păsările de la margine tind să se apropie ca mijloc de apărare, dar cele de la centru n-au de ce să se strângă ca să se simtă în siguranță: sunt apărate de cele de la margine.

Tot privind primele fotografii, am descoperit că fiecare pasăre tinde să stea la distanță mai mare de cele dinaintea și din spatele său decât de cele din laterale. Asemenea mașinilor pe autostradă: e perfect normal să ai două mașini la distanță laterală de doi metri, dar e absolut nerecomandabil să stai la doar doi metri distanță de mașina din fața ta.

În plus, tendința păsărilor de a se distanța de cele din față și de a sta mai aproape de cele din lateral e prezentă atât la grupurile mai compacte (distanță medie de circa optzeci de centimetri), cât și la grupurile mult mai rare (distanță medie de circa doi metri). Fenomenul acesta nu depinde de

distanța dintre păsări. Se poate presupune că nu e datorat unui fenomen de dinamică, așa cum se întâmplă în cazul avioanelor care trebuie să stea la distanță ca să evite turbulența celuilalt, pentru că în acest caz efectul ar fi mult mai mic atunci când păsările sunt mai distanțate. Fenomenul se datorează modului în care se orientează ele întâmplător pentru a-și menține traiectoriile fără să se ciocnească.

Ceva nou

Această caracteristică a pozițiilor graurilor ne-a permis să ajungem la un rezultat cu adevărat neașteptat: interacțiunea dintre grauri nu depinde atât de distanța dintre ei, cât de legătura dintre păsările mai apropiate. Pare foarte natural: dacă alerg cu un grup de prieteni și o iau la dreapta, atunci, ca să nu pierd ritmul, atenția mea se concentrează pe colegul cel mai apropiat (care poate fi la unul sau doi metri

distanță) și nu mă preocupă deloc ce fac colegii mai depărtați. În fond, *a posteriori*, era cât se poate de evident; dar în fizică și în matematică e impresionantă disproporția dintre efortul pentru a înțelege ceva nou pentru prima dată și simplitatea rezultatului, naturalețea sa odată ce au fost parcurse diferitele etape. În știință, ca și în poezie, în produsul finit nu mai rămâne nicio urmă din osteneala procesului creativ și din ezitările care-l însoțesc.

Începând cu legea gravitației universale a lui Newton („forța de gravitație dintre două corpuri e invers proporțională cu pătratul distanței", mai țineți minte?), fizica s-a obișnuit cu interacțiunile care depind de distanță. Așa că nu-ți trece prin cap că distanța ar putea avea un rol marginal în determinarea forței de interacțiune până când datele experimentale nu-ți deschid ochii.

Cum s-a întâmplat în cazul nostru? Am exprimat, mai întâi, în

manieră cantitativă observațiile precedente asupra tendinței păsărilor de a respecta o „distanță de siguranță“ mai mare cu tovarășii de zbor dinainte decât cu cei din lateral: am definit astfel o mărime pe care am numit-o *anizotropie* (în fizică, o mărime e anizotropă dacă are valori diferite în direcții spațiale diferite). Dacă într-un șir de fotografii ale unui anumit stol măsuram anizotropia perechilor de păsări vecine, găseam o valoare ridicată, în timp ce pentru păsările depărtate valoarea era practic nulă. Până aici eram mulțumiți: ne așteptam ca păsările depărtate una de alta să nu aibă informații despre poziția lor reciprocă și era logic să nu existe diferență între distanțele laterale și cele frontale.

Problemele serioase au apărut când am început să comparăm anizotropia între păsări aflate la aceeași distanță reciprocă măsurată în diferite șiruri de fotografii. Nu se potrivea nimic:

uneori, anizotropia unor păsări la doi metri distanță era foarte mare, iar în alte grupuri de fotografii, anizotropia la aceeași distanță era complet neglijabilă. Datele păreau să nu aibă sens. Până la urmă, ne-am dat seama că nu avea sens să comparăm comportarea a două păsări la aceeași distanță în stoluri diferite, pentru că distanța dintre păsările cele mai apropiate poate varia mult de la stol la stol.

Am schimbat punctul de vedere: pentru fiecare pasăre, am definit primul vecin, adică pasărea cea mai apropiată de ea, al doilea vecin, al treilea vecin... Am descoperit că anizotropia era ridicată între primii vecini, mai mică între următorii doi, devenind practic nulă la al șaptelea vecin. La prima vedere pare să nu fie nimic mai mult față de analiza precedentă: anizotropia scade odată cu distanța. Dar lucrurile se schimbă când comparăm stolurile: anizotropia e aceeași pentru perechi

de primi vecini din stoluri diferite, chiar dacă distanța medie dintre aceste cupluri era într-un stol mai mult decât dublul celei din alt stol. Ajunși aici, nu trebuia să ne întrebuințăm intelectual prea mult ca să presupunem o interacțiune între păsări care nu depinde de distanța absolută a perechilor, ci de raporturile relative dintre distanțe.

Acesta a fost rezultatul primei noastre lucrări din 2008. A trecut mult de-atunci. S-a schimbat componența grupurilor de cercetare, eu am început să lucrez numai asupra sticlei, au venit finanțări noi și s-a cumpărat aparatură mult mai avansată: apăruseră pe piață aparate de fotografiat capabile să declanșeze până la o sută șaizeci de fotograme pe secundă, la patru megapixeli.

A fost o muncă asiduă, idei noi, algoritmi noi: reușim acum să determinăm cu precizie de câteva sutimi de secundă momentul în care fiecare pasăre începe să se rotească

atunci când stolul virează. Aproape întotdeauna, un grup mic aflat într-o margine începe să se rotească și în foarte scurt timp — câteva zecimi de secundă pentru stolurile mici și o secundă și mai bine pentru cele mari — toate păsările îl urmează. După o lungă analiză a datelor și după delicate considerații teoretice, am priceput cum comportarea cantitativă a stolului, chiar și în timpul unui viraj, poate fi înțeleasă în toate detaliile: păsările ascultă de niște reguli simple, pe care le-am reconstituit din măsurătorile efectuate, și se mișcă adaptându-se poziției vecinilor. Informația despre viraj se transmite rapid de la o pasăre la alta, ca o parolă de trecere de mare viteză.

Cercetările noastre au schimbat complet paradigma folosită până atunci în cercetările asupra stolurilor, bancurilor și turmelor. Într-adevăr, înainte de lucrarea noastră, era luat de sigur că interacțiunea depinde de

distanță. După lucrarea noastră, în schimb, e necesar să se considere că interacțiunea are loc întotdeauna cu cei mai apropiați. Dar poate că rezultatul cel mai interesant era demonstrația directă că era posibil să urmărești simultan poziția a mii de păsări și să extragi din aceste date informații utile pentru a înțelege comportamentul animal.

Rezultatele noastre au fost posibile, pentru că am folosit tehnici cantitative pentru studiul statistic al comportamentului unui grup de animale foarte numeros. Am definit noi standarde de cercetare folosind în biologie tehnici apărute și dezvoltate în fizica statistică pentru rezolvarea unor probleme de dezordine și complexitate. Nu chiar toți biologii au apreciat această invazie a domeniului lor: unii s-au arătat interesați de rezultat, în timp ce alții au găsit cercetarea noastră prea săracă în biologie și prea bogată în matematică. Articolul a fost

respins de mai multe reviste, care probabil că, apoi, și-au mușcat degetele: după marele succes al primului nostru articol, citat deja în aproape două mii de publicații științifice, au urmat multe altele.

Biologia traversează o perioadă de mari transformări: cunoașterea unui număr de date care crește nemăsurat face nu doar posibilă, ci chiar necesară utilizarea metodelor cantitative. Metodele acestea se pot folosi oportun sau inoportun, depinde mult de context. În etologie, în particular, în studiul comportamentului animal, excesul de matematică generează ușor o reacție negativă. Într-adevăr, etologii caută cauza anumitor comportamente, în timp ce s-ar putea crede că metodele cantitative sunt pur descriptive și nu ajung în miezul cercetării etologice.

Cu toate acestea, spiritul multor discipline științifice s-a schimbat odată cu trecerea anilor; dar asta s-a

întâmplat în urma unor discuții înfocate despre relevanța anumitor metodologii, care anume sunt științifice și care trebuie respinse pentru că nu răspund adevăratelor întrebări ale disciplinei respective. Ne vin în minte, de exemplu, acele cuvinte cinice ale lui Max Planck, întemeietorul mecanicii cuantice: „Un nou adevăr științific nu triumfă pentru că oponenții lui se conving și văd lumina, ci mai degrabă pentru că până la urmă ei mor și sunt înlocuiți de o nouă generație căreia noile concepte îi devin familiare“. Eu sunt mai optimist decât Planck: cred că, înarmați cu multă bunăvoință și cu multă răbdare, se poate, măcar în cea mai mare parte dintre cazuri, să ajungem la concluzii acceptate de toți sau, cel puțin, să clarificăm chestiunile în litigiu.

Fizica la Roma, acum cincizeci de ani

Impresia pe care mi-o făcusem — complet nemotivat —, aceea că fizica era mai dificilă decât matematica, și prin urmare mi se părea că ocupându-mă de fizică m-aș fi implicat mai mult, că ar fi fost o provocare mai mare.

E important să păstrăm memoria trecutului, cu atât mai mult în domeniul științei, de aceea aș vrea să evoc primii mei ani de studii universitare și fizica acelui timp. Nu sunt istoric: mă voi limita la amintiri, acelea ale unui fizician teoretician, interesat de fizica particulelor elementare.

M-am înscris la universitate în noiembrie 1966. Pe-atunci, studenții din primii doi ani nu aveau voie să

colinde liber prin Institutul de Fizică. Urmăreau lecțiile de fizică generală și de experiment fizic, dar foloseau ușa din spate: nimeni nu concepea ca pâlcurile de studenți să intre și să iasă pe ușa principală, controlată cu cerbicie de Agostino, istoricul portar de la Fizică — avea o memorie uluitoare căreia nu-i scăpa nimic. Agostino îi bloca pe studenții din primii doi ani întrebându-i cu ce treabă veniseră. Cum majoritatea chiar n-aveau nicio treabă (cu excepția unor ocazii speciale), îi alunga spre ușa din dos.

Eram vreo patru sute de înscriși la cursurile de anul întâi și nu existau microfoane: profesorii erau nevoiți să țipe ca să se facă auziți. Lecțiile de fizică generală, de departe cursul cel mai important și formativ, erau ținute de Edoardo Amaldi și Giorgio Salvini, fiecare o dată la doi ani. Eu l-am nimerit pe Salvini, care era un *showman*, spre deosebire de Amaldi, care era mai reținut. Într-o zi, Salvini

a apărut cu un scaun rotativ, a început să se învârtă din ce în ce mai repede, cu picioarele ridicate și cu două leviere grele din fier în mâini, arătându-ne cum se rotește mai repede când strângea brațele pe lângă corp și mai încet când le deschidea. Balerinii cunosc prea bine acest fenomen: ca să facă o piruetă, pleacă cu brațele deschise și le închid în timp ce se rotesc. Lecția s-a încheiat cu enunțul legii de conservare a momentului unghiular, lege care explica fenomenul observat.

Intram pe ușa principală mai ales ca să mergem la laboratorul de Fizicuță, numit astfel ca să-l deosebim de cel de fizică generală, căruia-i spuneam Fizichioaia. Exercițiile aveau loc într-un labirint de săli subterane (mi le amintesc umede și cu o pardoseală din ciment): în fiecare sală aveam de făcut un alt experiment (presiune atmosferică, căderea unui corp greu

pe un plan înclinat cu frecare moderată, măsurarea energiei necesare pentru a topi gheața...) Mergeam în grupuri de treizeci: câte zece mese în fiecare sală și trei persoane la o masă, grup de trei care nu se mai schimba de-a lungul anului academic. Era deci greu să întâlnim studenți din anii mai mari: nu intram în contact decât cu cei din anul nostru.

Șaizeci și optul

Anul 1968 a schimbat totul. Nu doar universitatea, ci și întreaga politică din Italia, din Europa și din lume: i-a urmat o enormă radicalizare politică a întregii societăți, care s-a reflectat asupra obiceiurilor. Oameni care, la fel ca mine, proveneau din medii orientate către dreapta moderată, în care se vota pentru partidul liberal sau pentru cel democrat creștin, s-au văzut azvârliți într-o situație de conflict social și au virat înspre idei

marxiste. Au curs fluvii de cerneală despre istoria acestui an, despre cauzele și despre efectele sale, așa că nu e cazul să reiau aici tema. Aș vrea totuși să povestesc despre efectele lui 1968 în cadrul Institutului de Fizică. Pentru mine, totul a început în marea aulă de fizică, cu o ședință la care s-au înghesuit de două ori mai mulți studenți decât cele trei sute de locuri pe scaune. Ședința a continuat întreaga după-amiază, până la nouă seara, când s-a supus la vot ocuparea facultății. S-a votat pentru ocupare cu majoritate confortabilă (cred că a fost doi la unu): decizia fusese a noastră, a studenților, așa că responsabilitatea a ceea ce se întâmpla în Institutul de Fizică avea să cadă asupra noastră, chiar și asupra celor care fuseseră contra și care, cu votul lor negativ, acceptaseră totuși legitimitatea votării.

Când domnul Caradonna, membru al *Movimento sociale,* a năvălit în universitate însoțit de

echipele lui de neofasciști înarmați cu bâte lungi și solide înfășurate în steaguri italiene, directorul institutului, Giorgio Careri, complet depășit de situație, își făcea griji pentru eventuala incendiere a bibliotecii care se afla la etajul al doilea al Institutului — asta pentru că extinctoarele fuseseră duse la Litere ca să fie folosite împotriva asediatorilor. Careri s-a apropiat de studenții care mențineau ordinea la ușa Institutului și le-a împărtășit grijile lui, încheind cu: „Dacă e să fie, faceți ca inevitabilul să se producă la etajul întâi“.

După perioada ocupării universităților, toate barierele dintre studenții din diferiți ani au căzut. La fel, cele dintre studenți, asistenți și tineri profesori. A urmat o puternică socializare între diversele componente ale lumii academice: am descoperit atunci că printre profesori se afla și Paolo Camiz, care se producea la Folkstudio cu un

foarte nostim repertoriu de *chansonnier* francez, lesne de găsit azi pe YouTube.

Existau două săli pentru consultarea cărților. Într-una, ai cărei pereți conțineau colecțiile decenale ale revistelor, se păstra o liniște respectuoasă; cealaltă era mai zgomotoasă: se vorbea, se râdea, spre seară se juca și bridge (briscola și scopone[1] nu erau considerate jocuri îndeajuns de serioase pentru fizicieni). Institutul era mult mai viu decât acum; seara, după nouă, se deschidea ușa din spate și intrau studenții care lucrau și nu puteau frecventa cursurile de zi.

După părerea mea, era o lume infinit mai tânără decât departamentul de Fizică de azi. Sigur că și eu eram mai tânăr, aveam cu peste cincizeci de ani mai puțin și frecventam oameni mai tineri decât cei cu care mă văd azi, dar, chiar în mod obiectiv, Institutul de Fizică era mai tânăr. Pe vremea aceea, Edoardo

Amaldi, mare șef al fizicii italiene, căruia i se spunea uneori „Tăticul“, avea șaizeci de ani. Sub el, catedrele fundamentale erau conduse de Giorgio Salvini, Marcello Conversi, Giorgio Careri și Marcello Cini, toți sub cincizeci de ani și sigur mai tineri decât profesorii actuali.

În 1966, Nicola Cabibbo a sosit la Sapienza. Profesor universitar plin la treizeci și unu de ani, era aureolat de glorie pentru teoria sa, cea a interacțiunilor slabe, bazată pe așa-zisul „unghi Cabibbo“, descoperire pentru care ar fi putut lua liniștit Nobelul. Era vârful de diamant al întregii fizici teoretice italiane: în 1968 avea treizeci și trei de ani, aceeași vârstă cu Francesco Calogero, cel care a primit în 1995 premiul Nobel pentru pace ca secretar general al grupului Pugwash, organizație nonguvernamentală apărută cu scopul de a garanta o dezvoltare științifică compatibilă cu o situație internațională pacifică.

Mulți dintre asistenții de la fizică teoretică erau chiar mai tineri, având cel mult treizeci de ani. Erau și persoane mai în vârstă, ca Enrico Persico, de exemplu, care însă a murit în 1969, înainte să împlinească șaizeci și nouă de ani. Dar eu n-aveam multe raporturi cu aceste persoane, întrucât cele mai multe cursuri erau ținute de profesori în jur de patruzeci și cinci de ani, situație foarte diferită de cea actuală.

Nu era doar impresia unui student tânăr, exista o explicație istorică. În anii cincizeci avusese loc o explozie a universității italiene, care se transforma în universitatea de masă pe care o cunoaștem azi. În particular, fizica se dezvoltase puternic și primise finanțări uriașe, inclusiv datorită lui Amaldi, care fusese prim-secretar general al CERN (*Conseil européen pour la recherche nucléaire*, Organizația europeană pentru cercetări nucleare): activitatea de cercetare era complet

internaționalizată, iar prestigiul pe care-l aveai în Italia era cel câștigat în străinătate. La Fizică, vechile ierarhii care dominau scena în alte institute sau facultăți (celebrii baroni) își pierduseră puterea și oamenii de știință cei mai buni ajungeau rapid la vârful puterii academice (eu am câștigat concursul de profesor la treizeci și doi de ani). Posturile stabile puteau veni la doar câțiva ani după absolvire. Când am început să lucrez la Laboratoarele naționale din Frascati, în 1970, la douăzeci și doi de ani, doi prieteni ai mei, Aurelio Grillo și Sergio Ferrara, de douăzeci și cinci de ani, erau deja angajați cu contract nedeterminat. Azi, la vârsta asta, dacă totul merge bine, ești la jumătatea doctoratului.

Comunicarea științifică

Suntem atât de obișnuiți cu ușurința de a ne transmite unul altuia cărți și articole pe internet sau de a vorbi la telefon la costuri de

nimic, încât ne imaginăm cu greu cum se făcea pe-atunci comunicarea științifică.

Convorbirile internaționale costau enorm. Cu Statele Unite plăteai 1 200 de lire pe minut, iar primul meu salariu de asistent era de 125 000 de lire pe lună: o convorbire de ceva mai mult de o oră și jumătate mi-ar fi mâncat toți banii.

Telefonul era deci folosit doar în cazuri excepționale. Unul dintre episoadele cele mai amuzante e legat de descoperirea particulei elementare *psi*, în noiembrie 1974. Particula era compusă din doi quarci cu charm; descoperirea a influențat puternic fizica particulelor elementare, fiind chiar numită *the November Revolution*. Particula fusese descoperită în Statele Unite, simultan în două laboratoare diferite. Vestea s-a răspândit rapid în toată lumea. Laboratoarele din Frascati și-au dat seama că puteau și ele s-o observe. S-au modificat imediat

parametrii experimentelor în curs și după numai o săptămână am observat și noi particula *psi* — toți fizicienii prezenți exultam.

Era un rezultat extrem de important; chiar dacă fusese obținut în urma americanilor și folosind informațiile produse de experimentele lor, acesta demonstra marile capacități italiene. Devenea crucială scrierea unui articol pentru cea mai importantă revistă de fizică (*Physical Review Letters*) și publicarea lui în același fascicol în care urma să apară articolele americane. Nu era timp de pierdut, revista închidea numărul; imediat după descoperire, articolul a fost scris repede în weekend și, ca să câștigăm timp, a fost dictat la telefon, procedeu absolut neobișnuit. Până și figurile cu grafice au fost transmise pe această cale, dictând coordonatele punctelor, un amic de pe partea cealaltă a Atlanticului refăcând figurile. Au fost dictate la telefon și

numele autorilor (o sută), pe litere și cu rezultate adesea comice. A dictat însuși Giorgio Salvini și, pentru că el spunea întotdeauna „S de la Salvini“, a dispărut din lista de autori, numele fiindu-i schimbat într-un „S“: într-adevăr, în loc de „G. Salvini, M. Spinetti“ s-a tipărit „G.S.M. Spinetti“. A fost absolut necesară o *errata corrige* foarte atentă.

Într-o colaborare științifică, se scriau lungi scrisori, adesea pline de formule. În Italia, acest mod de comunicare era extrem de dificil. Poșta noastră funcționa foarte prost: scrisori expediate par avion ajungeau după cincisprezece zile. Colaborarea la distanță era aproape imposibilă: trebuia ca toți să fie fizic în același loc.

În primăvara lui 1970, Nicola Cabibbo ne-a chemat, pe mine și pe Massimo Testa, doar un pic mai în vârstă decât mine, ca să ne citească o scrisoare manuscris primită de la Luciano Maiani, plecat de la Roma

pentru a lucra un an la Harvard. Maiani ne informa despre rezultatele obținute împreună cu Sheldon Glashow și John Iliopoulos. Scrisoarea m-a impresionat nu doar prin rezultatul științific extrem de important, ci și prin încheiere: „Am aruncat și copilul odată cu apa murdară din albie“. Într-adevăr, scrisoarea ne informa că programul de cercetare început de Nicola Cabibbo și Luciano Maiani cu câțiva ani înainte, pentru calculul unghiului Cabibbo, ajunsese la final. Rezulta că unghiul nu e calculabil, în schimb, scrisoarea conținea bazele a ceea ce, de la inițialele celor trei autori (Glashow–Iliopoulos–Maiani), avea să fie numit „mecanismul GIM“. Explicând cum anume sunt permise sau nu anumite interacțiuni între particule, mecanismul GIM prezicea existența necesară a curenților neutri slabi și a quarcilor cu charm, predicții verificate experimental, prima în 1973, iar a

doua — cum am văzut deja — în 1974.

Tehnologia

Cea mai mare parte a calculelor simple se făceau de mână, în cel mai bun caz, cu ajutorul calculatorului de buzunar. Rigla de calcul e un instrument de muzeu acum: ne permitea să facem rapid înmulțiri cu două–trei cifre și a fost măturată de calculatorul portabil. Îmi amintesc ce uimit am fost când, în 1973, am văzut unul pentru prima dată: costa cât tot salariul meu pe o lună.

Computerele — calculatoare li se spunea — erau foarte diferite de cele de azi. Aveau însă ceva comun cu cele actuale. Un bun prieten cu câțiva ani mai mare, Ettore Salusti, întâlnindu-mă pe culoar cu un pachet de cartele perforate de mână, m-a avertizat înțelept: „Ai grijă ce faci: calculatoarele sunt perverse“. Perversiunea computerelor e o temă care, în ciuda eforturilor unor

generații de informaticieni, n-a dispărut niciodată complet, după cum, din păcate, vedem de fiecare dată când survine un *crash* tocmai atunci când nu am salvat fișierul pe care lucram.

Calculatorul principal era o mașină UNIVAC puternică, accesibilă numai personalului tehnic, plasat în subteranele unei clădiri aflate la câteva sute de metri de Institutul de Fizică. Memoria lui, exclusiv discurile dure, reprezenta în jur de o zecime de megabyte, cam o milionime din memoria celularului meu. La etajul al doilea se găseau niște mașini cu tastatură — enorme mașini de scris — care perforau cartelele ce conțineau instrucțiunile programelor: pe fiecare cartelă se scria un rând cu maxim optzeci de caractere. În mijlocul sălii trona un terminal: o mașină în care se introduceau pachetele de cartele pe care le scrisesem cu greu la perforatoare; terminalul citea foarte

repede cartelele, vreo zece pe secundă. După un anume timp — care putea varia de la un minut la câteva ore —, o imprimantă rapidă dădea rezultatele pe niște foi mari de hârtie. Adesea puteai auzi pe cineva exclamând: „Futu-i, am uitat să pun punct și virgulă, rescriu cartela și-o luăm de la capăt!“ Se stătea la coadă pentru a pune pachetele de cartele în cititor, unii aveau pachete mici, puțin peste o sută de cartele, alții aduceau mii de cartele în niște cutii speciale, alungite. Odată, un coleg s-a împiedicat și cartelele, care umpleau o casetă de un metru, s-au împrăștiat prin toată sala. „Analiza datelor s-a încheiat“, a oftat. Erau cartelele programului: se afla la două treimi de finiș, dar ar fi fost un coșmar infinit să repună în ordine mia de cartele de pe jos. S-a hotărât să se mulțumească doar cu datele parțiale, a închis cercetarea și a trecut la alte subiecte.

Nu se punea problema înregistrării digitale a datelor, cu computerul: nu existau mașini capabile de așa ceva și nu existau interfețe între instrumentul de măsură și computer. Se avansa recopiind de mână datele pe care le nota computerul. Într-o situație specială, ca să analizăm semnale foarte rapide, am folosit una dintre cele mai noi cuceriri ale tehnologiei: o bandă de hârtie termică în stare să avanseze cu un metru pe secundă în timp ce un creion cald transcria semnalul, la fel ca la electrocardiograme, dar mult mai repede.

În fizica particulelor se foloseau mult scintigrafele care măsurau câțiva metri. Trecerea unei particule prin aparat produce scântei cu ajutorul cărora i se poate reconstrui traseul. Se fotografiau scânteile, apoi trebuia să le notăm coordonatele. Operațiunea aceasta (*scanning*) se făcea proiectând fotografiile pe niște mese mari deasupra cărora anumite

persoane, numai doamne, deplasau niște brațe de tip pantograph, iar când brațul se afla în punctul corect, apăsau o tastă pentru a imprima o cartelă perforată. Doamnele acestea lucrau într-o sală mare, la etajul al treilea; li se spunea, în glumă, „descanatoare“: sarcina lor extrem de plicticoasă era esențială pentru toate experimentele de fizica particulelor.

Fizica teoretică a particulelor elementare

În mediul meu de tânăr student, fizica teoretică a particulelor elementare era considerată *non plus ultra*[2]. Mulți prieteni extrem de buni, cu un an mai mari decât mine, n-au reușit să-și facă teza cu Nicola Cabibbo, foarte solicitat de studenții ajunși la licență; au trebuit să-și aleagă o teză dintr-un alt domeniu, cu alți profesori care erau printre cei mai buni din Italia, dar pentru ei asta reprezenta un fel de pas înapoi, o ratare.

De ce se bucura fizica teoretică a particulelor elementare de un asemenea succes? La Roma era foarte vie moștenirea lui Fermi și erau foarte puternice legăturile cu CERN din Geneva, cel mai mare centru de fizica particulelor din Europa și poate din lume; dar nu era doar asta. Fizica teoretică a particulelor părea înconjurată de o aură de mister. Acum, toată lumea știe că există quarci: ținuți laolaltă de gluonii care servesc de liant, reprezintă constituenții protonului și ai neutronului și există o teorie — cromodinamica cuantică (QCD) — care permite calculul proprietăților lor.

Pe-atunci nu se aflase aproape nimic. Încă din anii treizeci, se știa despre proton și neutron, apoi, treptat, în anii cincizeci și șaizeci s-a descoperit că existau multe alte particule, greu de observat din pricina timpului mediu de viață foarte scurt: o mare familie de

particule, azi numite barioni, între care protonul și neutronul erau singurele care nu se dezintegrau repede, fiind mai ușoare. Nu părea ca protonul și neutronul să aibă alte proprietăți particulare.

Faptul că exista o întreagă și numeroasă familie de particule asemănătoare și că se observau anumite tipuri de dezintegrare, și nu altele, ducea la presupunerea că aceste particule erau formate din componente care generau obiecte diferite combinându-se în diferite moduri. Aproape infinita varietate de substanțe chimice era combinația unei sute de atomi diferiți, atomii fiind constituiți din nuclee și din electroni, nucleele, din protoni și neutroni, dar din ce erau făcuți protonii și neutronii?

Nu era ușor de răspuns și nu existau indicii evidente. În 1962, americanul Geoffrey Chew a venit cu o propunere revoluționară: teoria *bootstrap*. Cuvântul e azi folosit în

jargonul informaticienilor pentru a denumi procesul de pornire a computerelor, dar, pe vremea aceea, îl foloseau doar câțiva tehnicieni superspecializați. Termenul înseamnă literal „șiret de cizmă“, iar un vestit proverb spune că „nu te poți ridica de la pământ trăgând de șireturile de la cizme“ (dacă n-ați încercat niciodată, puteți verifica ușor adevărul afirmației). Conform teoriei *bootstrap,* fiecare particulă era compusă cumva din toate celelalte particule; exista o „democrație“ a particulelor elementare, niciuna nu era mai „fundamentală“ decât celelalte. Milenara căutare a elementelor constitutive ale materiei (una dintre primele propuneri fusese „apă, aer, foc, pământ“) ajunsese la linia de sosire; nu existau elemente constitutive, ci doar relații între diferitele particule. Ideea a avut un succes enorm. În *Tao al fizicii,* publicat în 1975, când filosofia *bootstrap* era deja muribundă, Fritjof

Capra o înscria între filosofiile orientale; mie mi se părea mai degrabă că era o reluare a idealismului hegelian.

Existau multe școli de gândire care încercau să pună ordine în enorma cantitate de date folosind diferite principii, cum ar fi simetriile de orice fel sau imposibilitatea transmiterii informației cu viteză mai mare decât a luminii și așa mai departe. Erau școli care nu prea comunicau, având obiective limitate: *bootstrap* era propunerea cea mai radicală și care-și propunea să ajungă la o teorie completă.

Un cititor expert ar putea întreba: de ce nu se folosea o teorie bazată pe quarci? Quarcii fuseseră propuși de Murray Gell-Mann și George Zweig în 1964, iar, la doar câteva luni, Oscar Greenberg a adăugat culoarea (orice tip de quarc există în trei culori diferite). Quarcii fuseseră inițial introduși ca o simplificare matematică și faptul că nimeni nu

reușise să-i observe, în ciuda unor experimente foarte minuțioase, făcea ca existența lor să fie puțin credibilă. Predomina așa-numita „filosofie a fazanului și vițelului“, ca să folosim o imagine pe care, în urma unei discuții cu Valentine Telegdi, Gell-Mann o inserase într-un articol din 1964. Gell-Mann utilizase modelul cu quarci ca să deducă o serie de ecuații, dar, pentru el, acele ecuații erau mult mai importante decât modelul cu quarci de la care plecase, acela nefiind decât o simplă modalitate de a obține ecuațiile; odată găsite, putea să uite de modelul cu quarci și să rețină numai ecuațiile finale. Aceeași metodă era folosită în bucătăria franceză când o bucată de fazan era gătită între două felii de vițel: la masă era servit fazanul, vițelul se arunca. Chiar nici cei care luau în serios modelul cu quarci nu reușeau să-l folosească decât în mod foarte limitat.

Treptat, către sfârșitul anilor șaizeci, lucrurile s-au schimbat: au apărut date experimentale noi, teoria a fost rafinată și, până la urmă, s-a înțeles că acei quarci și gluoni colorați erau potențial în stare să explice datele experimentale. Succesul definitiv al acestui punct de vedere a survenit odată cu Revoluția din noiembrie 1974, când descoperirea particulelor *psi* și a proprietăților lor atât de ciudate au înclinat definitiv balanța către teoria pe care o cunoaștem azi.

Dar ce s-a ales de *bootstrap*?

La Institutul Weizmann, centru de cercetări israelian considerat printre cele mai importante din lume, lucra un grup puternic de fizicieni condus de un argentinian genial, Hector Rubinstein: sub îndrumarea sa, Miguel Virasoro, Gabriele Veneziano, Marco Ademollo și Adam Schwimmer au pornit o lungă serie de studii în fizica particulelor din care s-a născut teoria corzilor. Într-

adevăr, chiar dacă pasul fundamental către această teorie a fost făcut de Veneziano cu primul model de coardă deschisă în 1968, acele studii preliminare au fost extrem de importante pentru formarea cadrului conceptual în care a putut fi conceput modelul lui Veneziano. Stimulat de lucrarea lui, la doar câteva luni distanță, Virasoro a extins teoria introducând modelul corzilor închise. Aceste rezultate impresionante au produs un val de interes și, treptat, s-a descoperit că asemenea formule puteau fi obținute postulând că materia e constituită dintr-o coardă (elastică) și că diferitele particule corespund oscilațiilor sale. Din păcate, proprietățile corzilor nu permiteau descrierea directă a particulelor observate.

În 1974, Joël Scherk și John Schwarz și-au dat seama că teoria corzilor putea fi folosită ca punct de plecare pentru descrierea forței de

gravitație în context cuantic, chiar dacă, atunci, ca și acum, ne scapă multe detalii. E paradoxal că filosofia *bootstrap*, care voia să elimine constituenții elementari ai materiei, a fost cea care a dat naștere unei teorii noi în care tot ce există în univers (materia, lumina și undele gravitaționale) se compune din corzi.

Ideile funcționează adesea ca un bumerang: pleacă într-o direcție și ajung în altă parte. Dacă se obțin rezultate interesante și neașteptate, aplicațiile pot apărea în domenii cu totul neprevăzute.

În zilele noastre, înțelegem deja bine proprietățile protonului și ale celorlalte particule, dar, în ce privește gravitația cuantică, suntem într-o situație care amintește de cea de acum cincizeci de ani. Există mai multe școli de gândire: corzile, *loop gravity*[3] și așa mai departe. Dar e oare corectă vreuna dintre ele sau trebuie să așteptăm o nouă idee teoretică sau vreun experiment care să dea

rezultate nebănuite? Cum va arăta teoria finală? E greu de spus: oricât ne-am strădui să prevedem viitorul, el ne va lua prin surprindere.

---

[1] Jocuri de cărți tradiționale în Italia. (*N.t.)*

[2] De nedepășit — în lat. (*N.t.*)

[3] Gravitație cu bucle — în engl. (*N.t.*)

Tranziții de fază sau fenomenele colective

Apa care fierbe și apa care îngheață: sunt fenomene extrem de stranii. Vedem cum o substanță își schimbă brusc forma doar pentru că s-a modificat un pic temperatura. E vorba despre o schimbare colectivă: nu doar atomii individuali, nu moleculele individuale de apă îngheață sau fierb.

Tranzițiile de fază sunt fenomene ale fizicii „de toate zilele“, ne-am obișnuit să le vedem fără să le mai băgăm în seamă. Dar pentru un fizician sunt fenomene foarte interesant de înțeles. E motivul pentru care, la începutul anilor șaptezeci, am fost preocupat de studiul anumitor tranziții de fază

care până prin 1971, 1972 încă reprezentau o problemă deschisă.

Știm cu toții că apa începe să fiarbă la temperatura de 100°, adică trece din faza lichidă în cea gazoasă, la fel cum la 0° C trece din faza lichidă în cea solidă, gheața.

Pentru fizicieni, observarea acestor fenomene „normale“ generează nenumărate întrebări: de ce apar asemenea transformări? De ce tocmai la acele temperaturi? Se întâmplă la fel cu toate materialele? Și altele încă, ale căror răspunsuri sunt foarte greu de găsit.

În primul deceniu al secolului trecut, fizicienii au început să obțină dovezi experimentale pentru existența atomilor și a moleculelor pe post de „cărămizi“ constitutive ale materiei și au încercat să interpreteze fenomenele macroscopice, printre care și înghețarea apei, ca fenomene produse de comportamentul colectiv al acestor minuscule unități de materie.

Din punct de vedere microscopic, tranzițiile de fază devin cu mult mai greu de explicat și reprezintă o problemă care tot revine sub diferite înfățișări. Am început rezolvând cazurile cele mai simple, apoi, treptat, ne perfecționăm instrumentele și creștem numărul de cazuri rezolvate.

Pentru a studia tranzițiile de fază la nivel microscopic, trebuie să înțelegem comportamentul multor „obiecte“, adică atomi sau molecule, sau magneți minusculi: atâtea „lucruri elementare“ pe care — plasându-ne într-un context mai general decât al fizicii tradiționale — le-am putea numi „agenți“ care interacționează, schimbând informații și modificându-și comportamentul în funcție de informațiile primite.

În cazul fizicii, „a schimba informații“ e echivalent cu „a fi supus unor forțe“, dar, în general vorbind — dat fiind că modelul

poate fi aplicat în multe domenii de studiu, de la fizică la biologie și la economie etc. —, avem multe obiecte al căror comportament depinde de comportamentul altor obiecte care se află mai mult sau mai puțin aproape de ele; în mod normal, destul de aproape, pentru că obiectele prea depărtate nu reușesc să schimbe informații unul cu celălalt.

Mărimile fizice pe care le putem măsura la nivel macroscopic, cum e temperatura apei, depind de comportarea agenților microscopici, de exemplu de viteza moleculelor, pe care noi n-o putem observa.

Să ne închipuim că privim apa cu un microscop foarte sensibil. Am vedea molecule de forma unui ghidon un pic curbat care se mișcă, se atrag, se rotesc și vibrează cu viteză. Aceasta e descrierea apei la nivel molecular. Dacă însă privim apa la scara ochiului uman, vedem un lichid care îngheață și se solidifică la o anumită temperatură, iar la o

altă temperatură se evaporă, devenind gaz. Cum se face trecerea de la comportamentul atomilor individuali la comportamentul global al sistemului e o problemă a cărei rezolvare a luat mult timp.

Tranziții de fază de ordinul întâi

Pe cei care studiază tranzițiile de fază îi interesează mai ales să le înțeleagă mecanismul, nu neapărat să afle la ce temperatură sau presiune are loc schimbarea de stare. Din ce cauză, de exemplu, fenomenul se petrece dintr-odată și într-un „punct" atât de specific? Ce anume se schimbă în sistem la 100° C? De ce observând sistemul la o temperatură cu doar un grad mai mică decât cea critică nu sesizăm nimic? Apoi, de ce ajunge un singur grad în plus pentru a avea o schimbare bruscă în comportarea macroscopică?

Din punct de vedere conceptual, rezolvarea acestei probleme nu e defel banală: în anii treizeci, de

altfel, mulți fizicieni se întrebau dacă regulile obișnuite ale fizicii și, în particular, ale mecanicii statistice erau suficiente pentru explicarea tranzițiilor de fază.

Soluția a fost găsită în anii patruzeci și cincizeci, pornind de la o idee destul de generală în fizică: minimizarea energiei. În natură, un obiect care se mișcă liber va căuta să ajungă într-o poziție de energie minimă până când va ajunge într-un punct de echilibru. De exemplu, o minge lăsată să cadă liber într-un șanț se va rostogoli până în josul gropii. Poziția din fundul șanțului reprezintă o poziție de echilibru stabil pe care mingea n-o va părăsi dacă nu intervine ceva care s-o oblige.

Ceva asemănător se petrece cu gheața care, sub temperatura de 0° C, se află în echilibru stabil (solid) corespunzător unui minim al energiei sale libere. Crescând temperatura, moleculele care în faza

solidă ocupau anumite poziții precise în rețeaua cristalină încep să se agite, își pierd acele poziții și se mișcă liber. Aceasta e faza lichidă care reprezintă, la rândul ei, un echilibru stabil și corespunde unui alt punct de minim al energiei libere.

A încălzi apa e ca și cum ai da șuturi mingii: câtă vreme șuturile nu sunt puternice, mingea se va mișca, dar nu va avea energie suficientă pentru a ieși din șanț; când șuturile sunt puternice, mingea va căpăta suficientă energie pentru a ieși din șanț și se va mișca până va atinge o altă poziție de echilibru.

La fel și moleculele de apă, nemișcate în rețeaua lor cristalină care definește faza solidă, se vor agita cu atât mai tare cu cât va crește temperatura până când, la 0° C, legăturile care le țineau laolaltă încep să se rupă. În această fază, dacă se continuă încălzirea, temperatura nu va mai crește, ci energia furnizată sistemului va rupe legăturile dintre

molecule, până când toată gheața se va fi topit, devenind apă și găsindu-și în faza lichidă noua poziție de echilibru stabil.

Acest tip de tranziții de fază, zise de ordinul întâi, sunt caracterizate de două proprietăți importante.

Prima e faptul că, în apropierea punctului critic, sistemul nu prezintă nicio caracteristică microscopică menită să sugereze o iminentă transformare. La 0,5° C, apa nu dă niciun semn din care să înțelegem că, dacă-i mai scădem temperatura cu încă jumătate de grad, va începe să înghețe. Nu se formează insule de gheață în apă, nici insule de apă în gheață atunci când sistemul se apropie de temperatura critică.

Al doilea fenomen semnificativ e existența *căldurii latente,* acea cantitate de căldură care rupe legăturile moleculare în loc să crească temperatura sistemului. Căldura pe care o furnizăm când gheața se află la 0° C va fi folosită

pentru ruperea legăturilor până când se va topi toată gheața. Această cantitate de căldură pe care trebuie s-o furnizăm sistemului pentru a-l determina să-și schimbe starea se numește căldură latentă.

Uneori, aceste tranziții de fază sunt descrise ca tranziții de la o stare de ordine a sistemului la o stare dezordonată. Într-adevăr, în starea solidă, moleculele ocupă puncte precise din rețeaua cristalină și se află deci într-o stare ordonată. În faza lichidă, moleculele de apă se pot mișca liber, iar situația microscopică apare mult mai dezordonată decât în faza precedentă.

Tranziții de fază de ordinul al doilea

Nu toate materialele se comportă asemenea apei. Există alte tranziții de fază care au loc fără prezența căldurii latente, adică fără ca, odată atinsă temperatura critică, să mai fie nevoie de o anumită cantitate de căldură pentru a trece dintr-o stare în alta.

În aceste cazuri, tranziția se face continuu, încetișor, am putea spune, pe măsură ce se apropie temperatura critică. Acestea se numesc tranziții de fază de ordinul al doilea.

Iată un exemplu: calamita, care la temperatura ambientă e un sistem magnetic, își pierde magnetizarea pe măsură ce crește temperatura. În termeni tehnici, se spune despre calamită că trece dintr-o fază electromagnetică într-o fază paramagnetică (nemagnetică).

Să vedem un pic ce se întâmplă în interiorul sistemului. Putem vizualiza câmpul magnetic al calamitei ca o săgeată orientată în spațiu, la fel ca acul unei busole, cu capătul săgeții îndreptat spre nord.

Acest câmp magnetic macroscopic e generat de suma foarte multor câmpuri magnetice elementare ale fiecărei particule din sistem; aceste câmpuri magnetice sunt numite *spini*. În interiorul calamitei, interacțiunile între spini conduc la

alinierea lor într-o direcție comună: un număr foarte ridicat de mici săgeți care împung în aceeași direcție.

Și în cazul magnetizării, tranziția de fază survine odată cu creșterea temperaturii. Căldura furnizată magnetului provoacă o creștere a mișcărilor spinilor, care-și pot diversifica orientarea. Vor tinde așadar către dezordine, pierzându-și alinierea. Or, tocmai alinierea lor genera câmpul magnetic macroscopic: odată cu creșterea temperaturii, acest câmp magnetic va slăbi până când se va anula complet.

Și în acest caz tranziția de fază se poate descrie ca trecerea sistemului dintr-o fază mai ordonată către una mai puțin ordonată.

Ca să înțelegem mai bine, ne putem ajuta de modelul propus în 1924 de studentul Ernst Ising în teza lui de doctorat, poate primul model inventat de fizicieni pentru a ajuta

înțelegerea realității simplificându-i la maxim descrierea. Modelul acesta le permite spinilor să se orienteze în numai două direcții: sus sau jos, ca în figura 1, în timp ce orice alte orientări sunt interzise.

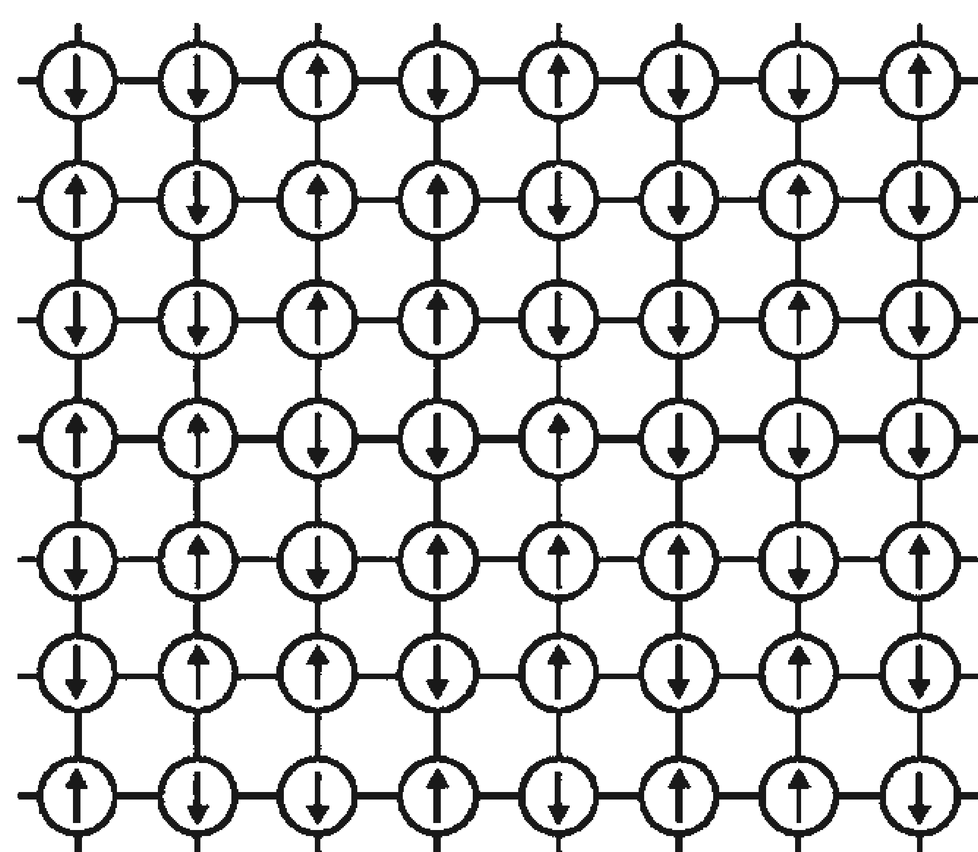


Figura 1. O rețea Ising

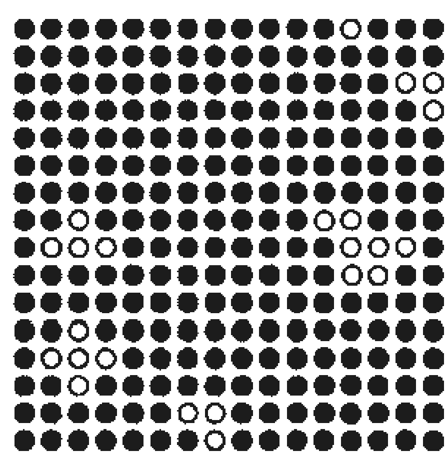
Forța care există între spini e de așa natură, încât ei tind să se alinieze în aceeași direcție (ori toți în sus, ori toți în jos), în timp ce agitația termică va tinde să strice alinierea și să răstoarne câte unul în sens contrar celorlalți.

Faza feromagnetică corespunde majorității spinilor orientați într-o

aceeași direcție (faza ordonată), în timp ce faza paramagnetică va fi descrisă de 50% dintre spini orientați în sus și 50% orientați în jos, distribuiți la întâmplare (faza dezordonată).

Sistemul mai poate fi descris și în termeni de simetrie. Dacă o transformare nu schimbă caracteristicile sistemului, atunci vorbim despre o simetrie a sistemului.

Să luăm, de exemplu, transformarea „inversiune a tuturor spinilor". Aplicând-o fazei dezordonate sau paramagnetice, nu vom schimba nimic, vom avea tot 50% de spini în sus și 50% în jos, distribuiți tot întâmplător: e vorba deci despre o simetrie a sistemului.


Faza feromagnetică

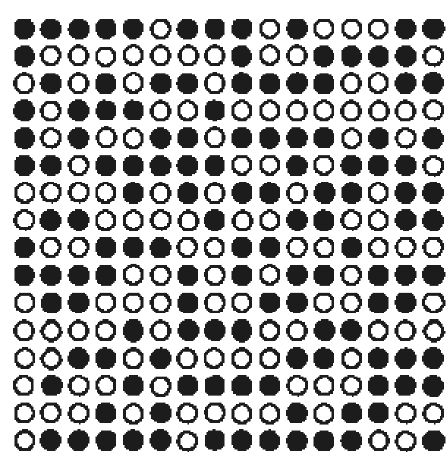

Faza paramagnetică

Figura 2. Fazele modelului lui Ising. Culoarea gri indică spinii orientați în jos, în timp ce albul corespunde spinilor orientați în sus. În faza feromagnetică se văd insulițe de spin care împung în sus (albe), în timp ce celelalte, care sunt majoritatea (cei gri), împung în jos. În faza paramagnetică spinii sunt distribuiți la întâmplare, jumătate în sus, jumătate în jos.

Sub temperatura critică, în schimb, când majoritatea spinilor va fi orientată în una dintre direcții (ca în figura 2a, în care bilele majoritare sunt gri), inversiunea lor se va traduce în inversarea câmpului magnetic macroscopic generat, care își va schimba semnul (adică bilele, în majoritate, vor deveni albe). Așadar, pentru faza ordonată sau feromagnetică inversiunea spinilor nu e invariantă, pentru că inversează câmpul magnetic.

În acest caz spunem că s-a produs o „rupere spontană a simetriei“ între

cele două faze: o simetrie (inversiunea spinilor), existentă în faza paramagnetică, nu mai există după tranziția de fază, când sistemul se află în faza feromagnetică. Această simetrie s-a rupt în mod spontan, fără intervenția unor fenomene exterioare.

Tranzițiile magnetice fac parte din clasa tranzițiilor de fază de ordinul al doilea, caracterizate de un parametru numit „parametru de ordine“, denumire care amintește de trecerea din tranziție de la o fază ordonată la una dezordonată a sistemului.

La prima vedere, sistemul magnetic pare mai simplu decât alte sisteme precum apa, pe care le-am discutat înainte, pentru că nu apar discontinuități. Dar în detalii dai de dracu', iar detaliile, în cazul tranzițiilor de ordinul al doilea, sunt foarte complicate.

Să luăm o calamită ținută la temperatură înaltă în așa fel încât să nu prezinte nicio magnetizare și s-o

plasăm într-un câmp magnetic, apoi să-i scădem treptat temperatura: vom vedea că sistemul se magnetizează din ce în ce mai ușor, pe măsură ce ne apropiem de temperatura critică. Odată atinsă această temperatură, survine tranziția, iar calamita capătă o magnetizare proprie, fără a mai avea nevoie de un câmp magnetic exterior.

În interiorul calamitei, se creează insule feromagnetice din ce în ce mai mari. Această situație de coexistență a celor două faze (ilustrată schematic în figura 3) e foarte complicat de studiat.

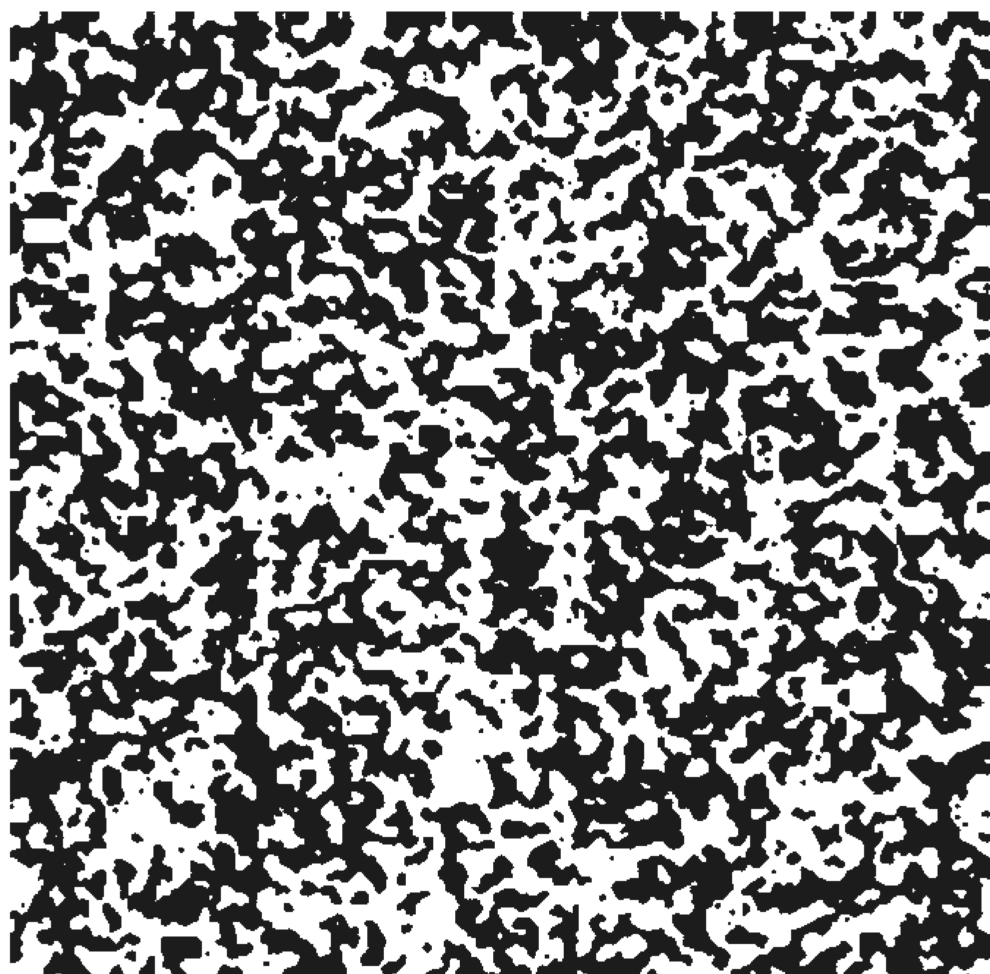


Figura 3. Model al unei calamite la temperatura critică. Se dezvoltă structuri feromagnetice care cresc în dimensiune pe măsură ce scade temperatura.

Clasele de universalitate

Fizicienii experimentaliști au observat un fapt interesant: comportarea unui sistem magnetic nu depinde mult de comportarea obiectelor elementare individuale din care e format.

Luând în considerare substanțe magnetice extrem de diverse, în care diferă interacțiunile dintre componentele microscopice și descrierea detaliilor cuantice, se observă că magnetizarea tinde către zero în apropierea temperaturii critice, urmând întotdeauna o aceeași evoluție descrisă matematic de o funcție power-law având la exponent același parametru numeric, numit β (beta), pentru o întreagă

clasă de substanțe magnetice foarte diferite între ele.

E ca și cum mașinile dintr-un Mare Premiu de Formula 1 ar face absolut ce vor în timpul cursei, dar ar încetini toate la fel în ultimul tur ca să se oprească pe linia de sosire.

A fost o descoperire surprinzătoare și neașteptată: în timp ce detaliile microscopice erau complet diferite, comportamentul colectiv era același. Rezultatul a fost formalizat de Leo Kadanoff, care a inventat ideea de *clase de universalitate* în care se puteau împărți fenomenele de tranziție de fază. Fenomenele cu aceeași valoare a exponentului beta stau într-o aceeași clasă.

Faptul acesta amintește de viziunea platonică asupra naturii: s-ar putea spune că există un număr relativ mic de clase de universalitate ale comportamentelor critice și fiecare sistem real e expresia uneia dintre ele (adică a unei idei, dacă e să folosim terminologia lui Platon).

Subdiviziunea claselor depinde de gradele de libertate a componentelor elementare ale sistemului. De exemplu, gradele de libertate diferă dacă spinii se pot mișca în toate trei direcțiile spațiale sau dacă sunt forțați să se miște doar pe un plan, sau dacă se pot numai roti: una peste alta, ei depind de cât și cum pot să se miște constituenții elementari ai materiei pe care o studiem, și doar de aceste grade de libertate depinde valoarea numărului pur beta.

La începutul anilor șaizeci, problema aceasta — vom vedea curând un exemplu concret — era pe bună dreptate considerată interesantă și lumea avea senzația că există deja toate instrumentele pentru a o rezolva găsind formalismul potrivit pentru calculul exponenților critici. Așa că m-am apucat să lucrez la tranzițiile de fază, crezând că aveam să ajung rapid la o soluție, ca să mă întorc apoi la problemele deschise din fizica

particulelor elementare, care păreau mai dure.

Invarianța de scară

În mod esențial, aveam de studiat sisteme cu interacțiuni magnetice puternice între spini. Interacțiunile de la nivelul microscopic erau cunoscute și trebuia găsit un formalism care, plecând de la descrierea microscopică cunoscută, să poată descrie sistemul la un nivel intermediar care să nu se mai refere la detaliile microscopice, dat fiind că felul în care se comportă magnetizarea nu depinde de aceste detalii. În nivelul intermediar, adică în așa-numitul *mezoscopic*, se studiază fluctuațiile sistemului: grupuri de atomi, mai mult sau mai puțin numeroase, care trec dintr-o fază în alta.

Evoluția sistemului se poate analiza studiind aceste fluctuații și interacțiunile lor reciproce. Așa cum vom vedea curând, fluctuațiile sunt

independente de scara folosită pentru a analiza sistemul.

Se lucrase deja mult: de exemplu, contribuțiile lui Giovanni Jona-Lasinio și Carlo di Castro la înțelegerea în detaliu a originii comportării mezoscopice. Doi pași înainte fundamentali fuseseră făcuți de Kenneth Wilson, prezentați în articole din 1971 și 1972: construcția unui formalism care permitea calculul exponenților critici. Acest formalism, numit „grup de renormalizare“, i-a adus premiul Nobel în 1982.

Grupul de renormalizare

Ca să înțelegem de ce tehnica propusă de Wilson pentru tratarea tranzițiilor de fază de ordinul al doilea a fost numită „grup de renormalizare“, trebuie să ne facem măcar o idee generală despre procedeul folosit de el.

Descrierea sistemului la nivel intermediar e o descriere invariantă

la transformări de scară: asta înseamnă că rezultatul observațiilor noastre nu depinde de cât de mult folosim *zoom*-ul.

Să privim figura 4.

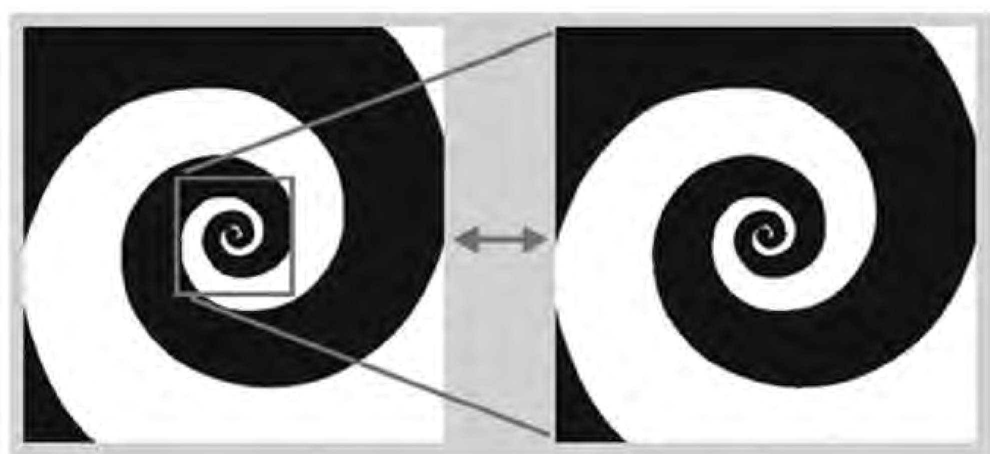


Figura 4. Invarianța de scară la o figură fractală

Imaginea din dreapta e amplificarea părții încadrate din imaginea din stânga: după cum se vede pe figură, nu putem distinge sistemul variind scara de observație sau, dacă vreți, *zoom*-ul cu care privim.

Să revenim la sistemul nostru prezentat schematic în figura 3. Fluctuațiile lui se comportă în esență în același mod, cu excepția unui factor de scară: cu cât privesc sistemul mai „de la distanță" (putem

să ne imaginăm un obiectiv superangular), cu atât mai mici apar fluctuațiile; cu cât mă apropii (făcând *zoom*), cu atât le văd mai mari.

Ideea, introdusă deja de Kadanoff, e de a împărți sistemul în pătrățele care conțin un anumit număr de spini. Să privim figura 5a: fiecare pătrat de dimensiune 3 x 3 grupează 9 spini. Pasul următor e să numărăm câți dintre aceștia împung în sus (negri) și câți, în jos (albi). Uitându-ne la pătratul 3 x 3 din stânga sus, vedem că sunt în el 6 pătrățele negre și 3 albe; așadar, majoritatea e de culoare neagră. Folosim această valoare abia calculată în imaginea din dreapta (figura 5b) ca și cum ar fi o entitate unică, un singur spin. Pătratul din stânga sus din figura 5b e, într-adevăr, negru. Fiecare dintre pătratele figurii 5b e format din spini de culoare determinată de culoarea majoritară între cei 9 spini din regiunea de plecare.

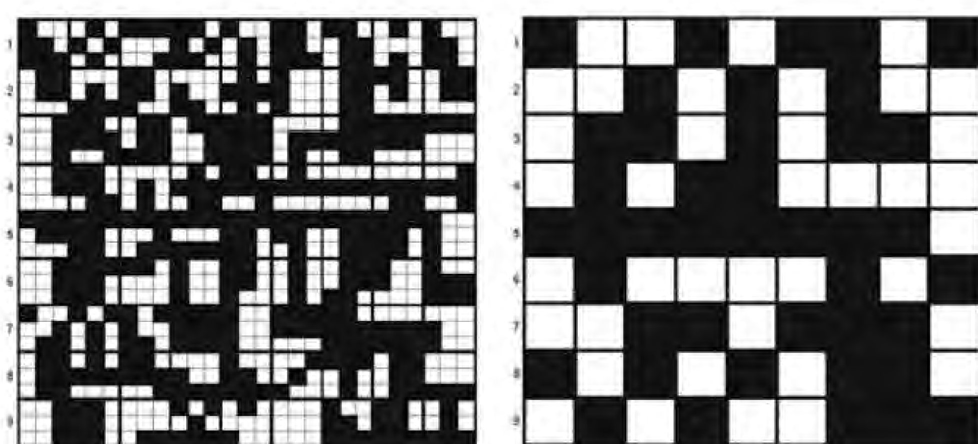


Figura 5. Figura 5b a fost realizată luând grupuri de pătrățele 3 x 3 din figura 5a și colorând pătratul respectiv din figura 5b în negru dacă majoritatea celor 9 pătrățele de plecare era neagră sau în alb în caz contrar.

Folosim astfel un mecanism analog celui de la prezidențialele americane: candidatul care obține majoritatea într-un stat ia toți delegații acelui stat.

De fiecare dată când facem această operație, schimbăm de fapt scara și scădem numărul de variabile luate în calcul (în loc de 9 spini de plecare în stânga sus din figura 5a, acum avem un singur spin în primul pătrat din figura 5b). Noua reprezentare a sistemului nostru (la scară mai mare) continuă să fie o reprezentare bună a

sistemului pe care doar îl privim „printr-o sită mai puțin fină“. Tehnica lui Wilson permitea trecerea de la o scară la una succesivă, de unde numele de „renormalizare“.

Așa că la începutul anilor șaptezeci tranzițiile de fază ale sistemelor magnetice și-au găsit descrierea potrivită, iar eu m-am întors la fizica particulelor elementare.

Sticle de spin: introducerea dezordinii

Mare parte din inteligența artificială care se află în cele mai banale aplicații ale internetului se bazează pe teoria sticlei de spin și pe rețelele neuronale.

Realizarea cea mai importantă a unei vieți de cercetător poate apărea complet întâmplător: dai peste ea pe drumul pe care porniseși în cu totul altă direcție.

Cu mine așa s-a întâmplat. Ceea ce e considerat cea mai bună contribuție a mea la fizică, anume teoria sticlelor de spin, s-a născut în timp ce studiam o problemă din fizica particulelor elementare.

Ca s-o rezolv, părea că instrumentul cel mai adecvat era o anumită tehnică matematică, numită

metoda replicării, necunoscută mie pe-atunci. Mi-am procurat toată literatura existentă despre subiect și am început s-o studiez. În metoda replicării se ia un sistem și se reproduce de mai multe ori, apoi se confruntă comportarea diferitelor replici. Părea într-adevăr potrivită pentru rezolvarea problemei mele, dar, în unul dintre cazurile descrise în literatură, dădea rezultate complet incoerente și nimeni nu înțelegea de ce.

Nu e tocmai o idee bună să ataci o problemă nouă, deci prin definiție, nu perfect clară, cu un instrument care poate că nu funcționează. Ar fi ca și cum ai folosi o busolă care din când în când arată sudul în loc de nord, dar fără să știi când și din ce motiv.

Așa că m-am hotărât să înțeleg câtă încredere se putea avea în instrument.

Era puțin înainte de Crăciunul lui 1978, lucram la Frascati pe-atunci.

Mi-am fotocopiat articolul ce prezenta cazul în care tehnica replicării ducea la rezultate neașteptate și l-am luat cu mine pe perioada vacanței.

Articolul trata probleme în legătură cu sistemele dezordonate și sticlele de spin, subiecte foarte departe de domeniul meu de cercetare din vremea aceea și de care nu mă ocupasem niciodată. Pe de altă parte, era crucial să înțeleg de ce nu funcționează metoda în acel caz. Am studiat modelul și am refăcut toate calculele: erau corecte, dar rezultatul era absurd. Chestiunea merita aprofundată.

Când m-am întors din vacanță, am găsit câteva lucrări în care se făceau progrese, soluția părând acum la îndemână. Am încercat să rezolv problema pornind de la acele studii mai avansate, crezând ca va fi simplu, dar cu cât lucram mai mult, cu atât problema părea mai dificilă.

Dacă unele rezultate deveneau coerente, altele se îndepărtau de valorile simulărilor numerice, iar acesta era un indiciu că soluția încă nu se întrevedea. Era probabil nevoie de o schimbare radicală de perspectivă.

Fără să-mi dau seama, exploram un domeniu nou de cercetare. Încetasem să mă gândesc la problema particulelor elementare de la care plecasem, deja mă interesa cu totul altceva.

Sticlele de spin

Sticlele de spin sunt aliaje metalice numite astfel pentru că tranziția lor de fază magnetică, datorată comportamentelor spinilor particulelor care formează aliajul, se comportă ca și tranzițiile de fază ale sticlei.

Aceste aliaje sunt formate din metale nobile, ca aurul ori argintul, în interiorul cărora s-a diluat o cantitate mică de fier. La alte

temperaturi se comportă aidoma unor sisteme magnetice normale, dar când temperatura scade sub o anumită valoare, atunci apar comportamente asemănătoare celor ale sticlei, ale cerii sau ale bitumului: modificările se fac din ce în ce mai lent și pare că sistemul nu poate ajunge niciodată în stare de echilibru.

La școală, învățăm că lichidele sunt materiale ce iau forma corpurilor solide în care sunt vărsate. E limpede deci că sticla, la temperaturi înalte, e un lichid, dar e la fel de evident că acest lichid se comportă într-o manieră neobișnuită. De exemplu, dacă luăm un recipient plin cu sticlă topită (sau cu miere ori cu ceară) și-l răsturnăm, lichidul nu cade imediat pe pardoseală, ci începe să „se scurgă" treptat din recipient. Pe măsură ce se răcește, sticla se scurge mai încet: dintr-un anume motiv,

comportamentul sistemului încetinește enorm.

Încetinirea puternică a dinamicii sistemului odată cu scăderea temperaturii are ceva comun cu comportamentul magnetizării aliajelor metalice. E ca și cum, scăzând temperatura, scad, în același timp, și posibilitățile de mișcare ale spinilor, fiind de-acum imposibil ca ei să ajungă în poziția de echilibru.

Să revenim la exemplul dinainte și să ne imaginăm un autobuz care se umple cu pasageri: atâta vreme cât densitatea e relativ scăzută, o persoană care vrea să meargă dintr-un punct în altul deplasează câteva persoane și trece. Evident, persoanele deplasate vor determina mișcarea altora, în lanț. Totul funcționează bine atâta verme cât există spațiu, dar odată cu creșterea densității, contactele sunt mai multe și spațiul dintre persoane scade, mișcarea devenind din ce în ce mai dificilă, fiecare fiind mai puțin mobil.

Englezii numesc asta *traffic jam* (blocaj în trafic, ambuteiaj).

Fenomenul era destul de general (cât privește sticla, ceara, mierea, smoala, aliajele metalice...) ca să-i motiveze pe oamenii de știință să-i studieze comportarea. Calea de atac cea mai potrivită era construirea unui model, inițial simplu, care să reproducă fenomenul. Astfel, s-ar fi putut găsi caracteristicile sau interacțiunile esențiale ce conduc la încetinirea dinamicii odată cu variația temperaturii. Caracteristici și interacțiuni care, prezente fiind în sticlă, în ceară, în miere, în bitum și în unele aliaje metalice, ar fi trebuit să nu fie prezente în apă sau, în general, în aproape toate celelalte lichide care nu au acest comportament.

Modelele

Studiul tranzițiilor de fază ale acestor materiale e dificil chiar și din punct de vedere experimental. Cu

titlu anecdotic, vă pot spune că, în Australia, se desfășoară un experiment unic în felul său. Au luat o cantitate de smoală la temperatură controlată, într-o fază în care există încă un pic de vâscozitate (smoala continuă să se miște și poate forma picături) și numără frecvența cu care cad picăturile. Experimentul a început în 1927 și până în 2014 au căzut doar nouă picături. De-atunci nu l-am mai urmărit, dar încă e dificil de imaginat cât timp trebuie să mai treacă pentru a avea un rezultat interesant...

Studiul acestor sisteme este complex, iar cel mai bine e, cu siguranță, să construiești un model sintetic mai simplu decât situațiile reale, care să ajute să găsim soluții.

Ca să înțelegem ce este un model și care poate fi utilitatea acestuia pentru un fizician teoretician, putem lua exemplul jocului de Monopoly. Reprezintă un model de societate în care au fost introduse doar câteva

reguli simple: dispoziția și prețul terenurilor, costurile de construcție și valorile veniturilor imobiliare. S-au adăugat apoi elemente întâmplătoare, mereu prezente în viața noastră: aruncatul zarului pentru a te deplasa, „chestiuni neprevăzute“ și „probabilități“ pentru a ieși sau pentru a intra în situații dificile.

Cu aceste reguli simple, după ce jucați o vreme, vă dați seama că se observă o caracteristică a sistemelor capitaliste: cine are mai mulți bani devine din ce în ce mai bogat.

La fel cum Monopoly nu conține întreaga complexitate a unei societăți reale, dar reușește să surprindă anumite caracteristici ale ei, modelele fizicienilor nu conțin întreaga complexitate a sistemelor reale, dar, dacă suntem în stare să introducem în model regulile semnificative, putem spera ca ele să reușească să reproducă unele dintre

caracteristicile fundamentale ale fenomenului pe care-l studiem.

Odată construit modelul și introduse regulile care-i descriu funcționarea, putem lăsa sistemul să evolueze, adică să începem partida de Monopoly, sau să simulăm la calculator tranziția de fază a sistemului, ridicând sau coborând ceea ce am definit drept temperatura modelului nostru sintetic.

În evoluția sa, modelul va genera anumite rezultate, cum ar fi, în cazul jocului Monopoly, „cine are mai mulți bani devine tot mai bogat“, sau, în cazul modelului Ising, faza feromagnetică ce apare odată cu scăderea temperaturii.

Începe apoi munca pentru dezvoltarea teoriei, adică a structurii matematice care să reproducă rezultatele simulării, pornind de la regulile și datele inițiale ale modelului nostru sintetic. Laboratorul experimental nu mai constă acum din magneți, circuite,

cuptoare sau cine știe ce altceva: acum e computerul, cu care nu mai vrem să reproducem funcționarea aliajelor metalice, ci pe aceea a modelului nostru.

Dacă reușim, vom trece apoi la înțelegerea felului în care noua teorie găsită e într-adevăr utilă în cazurile reale: aliaje metalice, sticlă, ceară și multe, multe alte sisteme.

Modelul sticlelor cu spin

În modelul lui Ising pe care l-am văzut mai înainte, forțele dintre spini sunt de așa natură, încât, la temperaturi joase, spinii tind să se alinieze în aceeași direcție: ori toți în sus, ori toți în jos.

În schimb, în modelul sticlei de spin, forța care acționează între unele cupluri de spini tinde să-i orienteze în direcții opuse, iar asta complică situația.

Iată un exemplu practic. În viață observăm ușor când obiectivele noastre nu se armonizează cu

obiectivele altora: suntem nevoiți să renunțăm la ale noastre. De exemplu, mie mi-ar plăcea să fiu prieten cu domnii Bianchi și Rossi, dar ei, din păcate, se urăsc, astfel că mi-e foarte greu să fiu, în același timp, prieten cu amândoi. Situația aceasta, oricum frustrantă, devine și mai complexă când sunt implicate mai multe persoane.

Să ne imaginăm o tragedie de felul următor: avem o luptă între două grupuri și fiecare personaj trebuie să se poziționeze de o parte sau alta. În plus, fiecare personaj nutrește sentimente puternice de simpatie sau de antipatie față de fiecare dintre celelalte (e chiar o tragedie!). Pentru simplitate, să presupunem că sentimentele de simpatie sau antipatie sunt reciproce (azi avem dezvoltate modele care permit și gestionarea situațiilor în care sentimentele nu sunt reciproce).

Să luăm trei pesonaje ale acestei drame, Anna, Beatrice și Carlo. Dacă

toți trei se simpatizează reciproc, nu e nicio problemă: vor alege același grup. La fel de simplă e soluția dacă doi dintre ei se simpatizează și ambii îl antipatizează pe al treilea. În acest caz, perechea în armonie va alege unul dintre grupuri, iar personajul al treilea va opta pentru celălalt grup. Dar ce se întâmplă când toți trei se antipatizează? Va rezulta un anumit grad de frustrare, pentru că două persoane care se antipatizează vor ajunge în mod necesar în același grup.

Când multe triouri sunt frustrate, situația începe să devină instabilă, unii pot încerca să schimbe grupul, în căutarea unei stări în care frustrarea totală să fie mai scăzută. Putem defini „tensiunea dramatică" drept numărul de triouri frustrate raportat la numărul total de triouri.

Studii amănunțite au arătat că în tragediile lui Shakespeare tensiunea dramatică astfel definită e destul de scăzută la început, ajunge la un

maxim către jumătatea reprezentației și apoi descrește spre final.

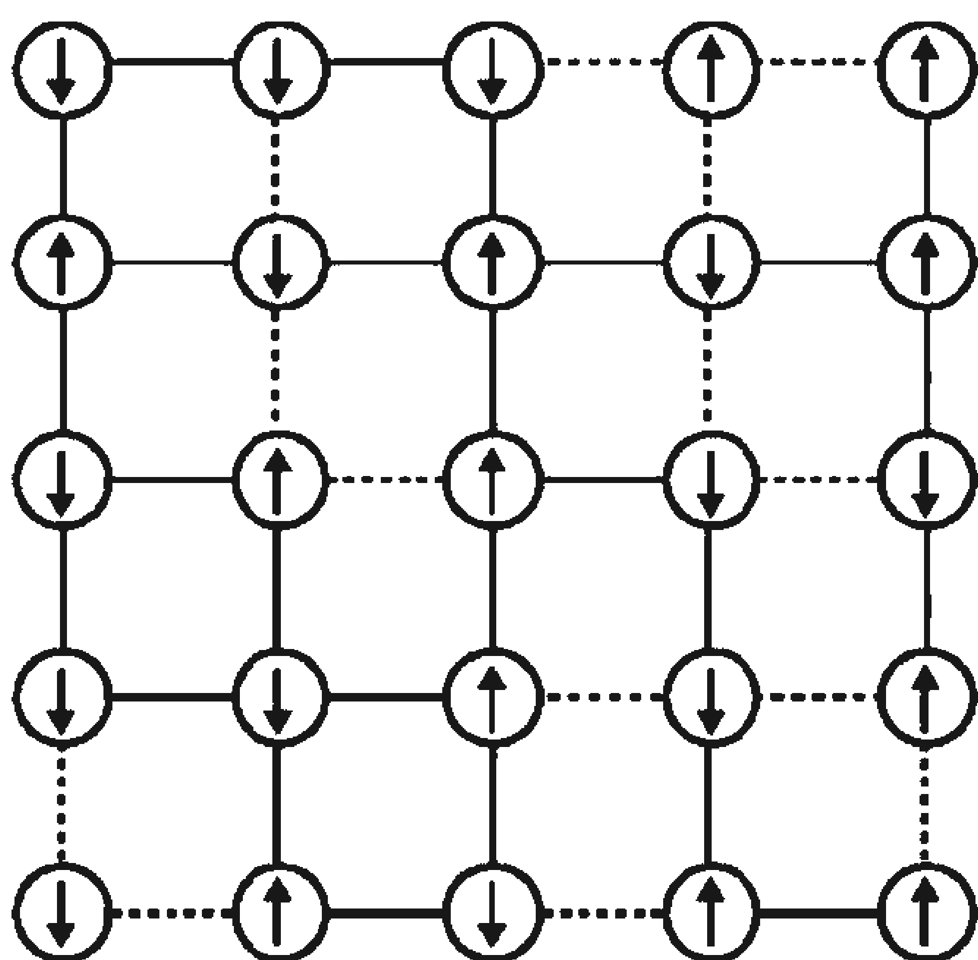


Figura 6. Schema unei sticle de spin. La temperatură joasă, spinii uniți de o linie punctată încearcă să se aranjeze în direcții opuse, în timp ce spinii legați prin linii continue încearcă să se alinieze în același sens.

În schema sticlei de spin ilustrată în figura 6, în care nu mai avem triouri, ci spinii sunt poziționați într-o rețea pătrată, fiecare spin se poate orienta în sus sau în jos (orice altă orientare e interzisă). Ceea ce anterior puteam defini drept „legătură simpatică“ va fi acum

„legătură feromagnetică“: e o forță care tinde să alinieze spinii în același sens, iar în figura 6 e reprezentată printr-o linie continuă. „Legătura antipatie“ devine „legătură antiferomagnetică“: e reprezentată de linia punctată și e o forță care tinde să alinieze spinii în sensuri opuse. Și în acest caz putem verifica ușor că există situații de frustrare. Să privim, de exemplu, figura 7.

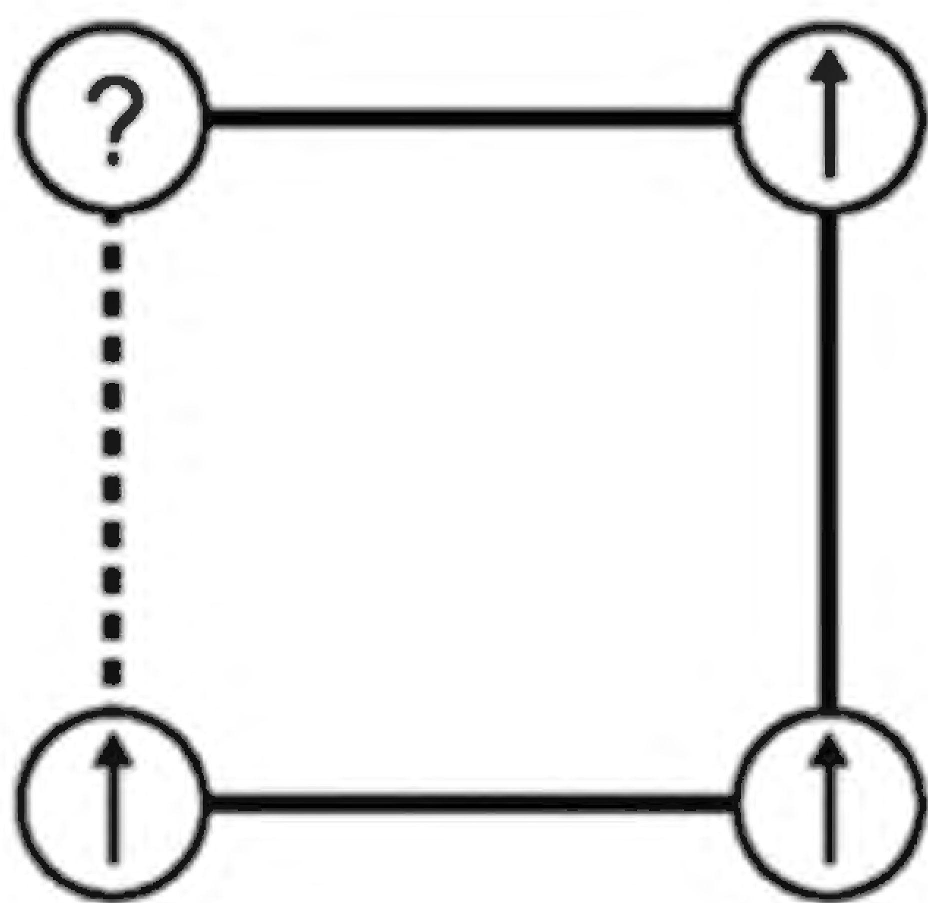


Figura 7. Cele trei legături cu linii continue sunt feromagnetice, în timp ce linia punctată e antiferomagnetică.

În acest caz, spinul din stânga sus are o legătură antiferomagnetică cu spinul de sub el și una feromagnetică cu spinul din dreapta, deci nu poate satisface decât pe unul dintre vecini și nu știe dacă să se alinieze în sus sau în jos.

Primele modele de sticle de spin au fost folosite de Edwards și Anderson, dar modelul cel mai simplu a fost construit de Sherrington și Kirkpatrick în 1975.

Revenind la problema mea, dacă se folosea metoda replicării pentru calculul mărimilor fizice din sistemul sticlelor de spin descrisă de modelul lui Sherrington și Kirkpatrick, se ajungea la o serie de incongruențe. De exemplu, calculul entropiei ducea la valori negative, ceea ce nu era posibil, din moment ce în orice sistem fizic, entropia e o variabilă pozitivă prin definiție. Dacă entropia unui sistem rezultă negativă din calcul, atunci ori calculele sunt greșite (se poate întâmpla, dar nu era

cazul nostru, verificaserăm cu toții), ori e pe undeva o eroare conceptuală.

Căutarea soluției

Inițial comiteam două erori conceptuale. În primul rând, a fost o eroare tehnică, și ca atare, e dificil de explicat nespecialiștilor; și era legată de niște ipoteze matematice greșite.

A doua a fost o eroare de fizică și ținea de faptul că habar nu aveam care sunt caracteristicile fenomenului pe care-l studiam (mi-au trebuit mai bine de trei ani ca să înțeleg sensul fizic al soluției matematice pe care o găsisem).

În primul articol pe care l-am scris despre acest subiect, în 1979, arătam că o anumită construcție putea fi folosită pentru a rezolva problema parțial. Iar la sfârșit, adăugam ingenuu: „Această construcție se poate generaliza pentru a obține soluția completă“.

Așa cum se face de obicei cu articolele științifice, înainte de a fi publicat, și articolul meu a fost trimis unui referent, adică unui coleg capabil să înțeleagă dacă articolul merita publicat sau nu. Comentariul lui a fost aproximativ acesta: „Ce face Parisi e absolut incomprehensibil; însă, dat fiind că ecuațiile dau rezultate care se potrivesc cu simulările numerice, articolul s-ar putea publica. Cât privește partea despre generalizarea metodei la cazul mai complicat, aia chiar nu face nici cât o ceapă degerată". Articolul a fost publicat, dar am tăiat ultima parte.

Dincolo de anecdote, adevărul e că eu chiar nu înțelegeam ce făceam. Găsisem câteva reguli ca să pot ataca problema, le aplicam, iar, la sfârșit, după o serie de pași, apăreau niște ecuații care aveau o semnificație și, chestiune fundamentală, reproduceau datele simulărilor

numerice și furnizau o valoare pozitivă a entropiei.

Dar ce se întâmpla în „mezzo dei calcoli“[4] nu înțelegeam: era ca și cum aș fi intrat într-un tunel, apoi m-aș fi trezit brusc de partea cealaltă.

În articolul următor, acordul dintre rezultatele teoriei și simulări sugera că teoria ar putea avea sens, dar sensul acesta rămânea obscur.

Faptul fizic pe care nu-l pricepeam era legat de ceea ce fizicienii numesc parametrul de ordine. Așa cum am văzut, trecerile de stare dintr-un sistem sunt caracterizate, în general, de variația unui parametru. De exemplu, parametrul de ordine pentru studiul tranziției dintre un lichid și un gaz e densitatea. În cazul tranziției magnetice, parametrul de ordine care trebuie studiat e magnetizarea. Acești parametri de ordine variază în timpul tranzițiilor de fază, luând diferite valori numerice ale căror semnificații fizice, ca de exemplu densitatea ori

magnetizarea, sunt foarte ușor de înțeles.

În mod surprinzător, în cazul rezultatelor mele pentru calculele asupra sticlelor de spin, parametrul de ordine nu mai era un simplu număr a cărui valoare se schimbă în timpul tranziției: acum ceea ce varia în timpul tranziției era o funcție. Nu era de ajuns un punct pentru a caracteriza tranziția, eram obligat să folosesc o funcție compusă nu doar dintr-un singur număr, ci dintr-o infinitate de numere.

Ce reprezenta această funcție din punct de vedere fizic? Apariția unei funcții în locul unui număr ca parametru de ordine pentru o tranziție indica și limita până la care se putea utiliza metoda replicării așa cum era folosită în mod normal. Dacă parametrul ar fi fost un număr unic, metoda replicării ar fi funcționat, producând rezultate absurde; dacă, în schimb, parametrul de ordine era o funcție, adică o

mulțime infinită de numere (așa cum o dreaptă poate fi văzută ca o mulțime infinită de puncte), atunci metoda replicării ducea la rezultate coerente.

Era clar că trebuia să existe o semnificație fizică profundă legată de necesitatea de a avea un număr infinit de parametri (adică o funcție) pentru descrierea tranziției sistemului, dar, la acel moment, această semnificație rămânea de neînțeles.

O matematică ciudată

Înainte de a trece la fizică, să încercăm să înțelegem în ce consta schimbarea din punct de vedere matematic.

Ca să fac să funcționeze metoda replicării, a trebuit s-o „extind". Posibilitatea de a extinde o metodă matematică se bazează pe o idee veche: probabil că primul care a folosit-o a fost Nicolas d'Oresme, abate, matematician, fizician și

economist francez care a trăit la jumătatea secolului al XIV-lea.

Nicolas d'Oresme a fost un personaj incredibil, ceea ce arată că Evul Mediu nu a fost acea epocă atât de întunecată pentru știință cum scria în manualele noastre la școală. Printre multe alte lucruri, ceea ce ne poate da o idee despre capacitățile lui este cartea scrisă (pe la 1360!) despre distorsiunea cauzată de refracția atmosferică asupra poziției stelelor. Evident, n-am citit-o în întregime, e în latină... Oricum, din punct de vedere conceptual, raționamentul său era corect. Probabil că ideea i-a venit observând Soarele care se îngustează pe orizont în momentul amurgului, ceea ce i-a sugerat că trebuie să fie o distorsiune. Calculul distorsiunii e foarte important pentru a face observații astronomice precise, deoarece măsura aparentă a stelelor trebuie corectată și cu două sau trei grade.

Revenind la ce ne interesează, Oresme a fost primul care și-a dat seama că a ridica un număr la puterea ½ e același lucru cu a-i extrage rădăcina pătrată. Nouă chestiunea ni se pare banală, o știm încă din liceu și nu ne mai dăm seama de saltul logic pe care l-a făcut Oresme extinzând proprietățile puterilor la numere fracționare, proprietăți rezervate, până atunci, doar numerelor întregi.

Ideea de a ridica un număr la o putere e extrem de simplă: a ridica un număr la pătrat înseamnă a lua de două ori acel număr și a face produsul. Pentru a-l ridica la cub, luăm numărul de trei ori și facem produsul și așa mai departe. Așa că a-l ridica la ½ pare să fie o operație absurdă: ce înseamnă „să iei un număr o jumătate de ori"? Ideea lui Oresme a fost să extindă o proprietate a ridicării la putere: aceea potrivit căreia când avem de ridicat la putere un număr la o putere,

trebuie să înmulțim exponenții. 22 ridicat la cub e egal cu 26 (adică 64 sau 43).

Dacă ridicând la pătrat un număr ridicat la ½ obținem numărul de plecare (deoarece 2 înmulțit cu ½ face 1), înseamnă că a ridica la puterea ½ e ca și cum ai extrage rădăcina pătrată: într-adevăr, rădăcina pătrată a unui număr ridicat la pătrat e numărul însuși.

Proprietățile acestea sunt obținute în mod formal, pentru că nu are sens să iei un număr de o jumătate de ori; dar proprietățile formale garantează un rezultat coerent. Nicolas d'Oresme a depășit punctul de vedere originar, înțelegerea imediată, dar păstrând proprietățile formale, a obținut o metodă foarte simplă pentru a rezolva și operații complexe.

După Oresme, matematica s-a dezvoltat adesea prin extinderea formală a anumitor proprietăți de la un context cunoscut la unul nou.

Ca să-mi rezolv problema, am folosit o metodă asemănătoare. Am aplicat formal tehnici matematice dezvoltate și verificate doar pentru numere întregi, sperând că proprietățile formalismului vor rămâne adevărate și pentru numere neîntregi.

Ideea mea a fost să extind combinatorica. Aceasta îmi spune, de exemplu, în câte moduri pot aranja zece obiecte în perechi în cinci casete. Prin extensie, pot folosi aceeași ecuație ca să aflu în câte moduri pot aranja cinci obiecte în zece casete, în așa fel ca în fiecare casetă să fie „o jumătate" de obiect. Sigur că rezultatul aproape că nu va avea sens, pentru că operațiunea nu se poate face efectiv, nu poți tăia un obiect pe jumătate, e ca și cum ai spune că numărul de obiecte care stau într-o casetă e o jumătate. Dar ca să obțin o soluție normală, în care există lucruri reale, trebuia să trec prin aceste obiecte imaginare: casete

în care se află o jumătate de obiect, un număr de obiecte care nu era întreg și un număr total neîntreg de moduri în care se puteau pune lucrurile neîntregi în casete!

Pornind de la acest procedeu, ideea mea a fost să împart obiectele în jumătăți, apoi, din nou în jumătăți și așa mai departe, făcând ca obiectele din casete să tindă la zero.

Evident, e vorba despre un procedeu exclusiv matematic, aproape lipsit de sens fizic, dar care ducea la rezultate corecte, compatibile cu datele simulărilor.

Rămâneau deschise două probleme: demonstrarea validității matematice a acestei operații și înțelegerea din punct de vedere fizic a faptului că parametrul de ordine era descris de o funcție, și nu de o singură variabilă.

Interpretarea fizică

Au trecut doar câțiva ani și limbajul matematic al metodei replicării a fost tradus în limbajul fizicii statistice, mult mai comprehensibil, chiar dacă formularea acestuia folosea mai multe cuvinte.

Folosind o serie de indicii, împreună cu prietenii mei Marc Mézard, Nicola Sourlas, Gérard Toulouse și Miguel Virasoro, am reușit să înțelegem semnificația fizică a rezultatului, o caracteristică proprie tuturor sistemelor dezordonate: anume, sistemele dezordonate se găsesc simultan într-un număr foarte mare de stări de echilibru diferite. Era o descoperire cu totul neașteptată.

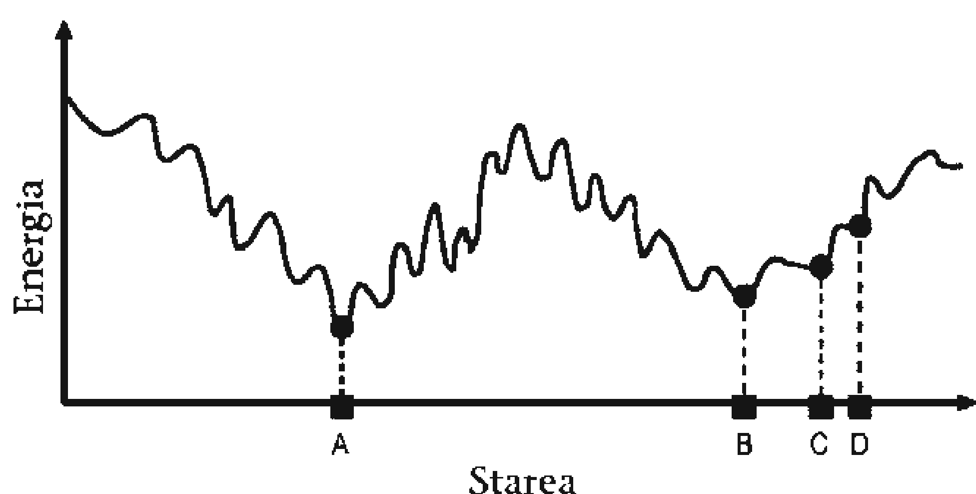


Figura 8. La temperaturi joase, sistemul poate sta în oricare dintre numeroasele stări reprezentate de grafic.

După cum se vede în figura 8, sistemul se poate afla în oricare stare de-a lungul liniei desenate (de exemplu, se văd patru puncte indicate cu A, B, C și D care reprezintă patru dintre foarte multele posibilități în care se poate găsi sistemul). Stările sistemului au energii diferite și există multe minime (gropi) de energie în care sistemul ajunge la echilibru. În starea marcată A, sistemul se află și în punctul cel mai de jos al regiunii, la fel ca în starea B, dar în stările C și D sistemul se află într-o groapă puțin adâncă (adică într-o situație de echilibru din care nu va ieși dacă nu se ridică temperatura sistemului), dar

care nu reprezintă un minim al acelei regiuni.

Pe grafic mai observăm și două văi mai largi (regiunea din jurul lui A și regiunea din jurul lui B), fiecare dintre ele conținând mai multe gropi mici. Să le numim zona M și zona N (figura 9). Când sistemul, răcindu-se, ajunge într-o stare din regiunea N (de exemplu, în oricare dintre stările B, C ori D), el va tinde să rămână în acea regiune chiar și când se va ridica temperatura, dacă încălzirea nu va fi mare.

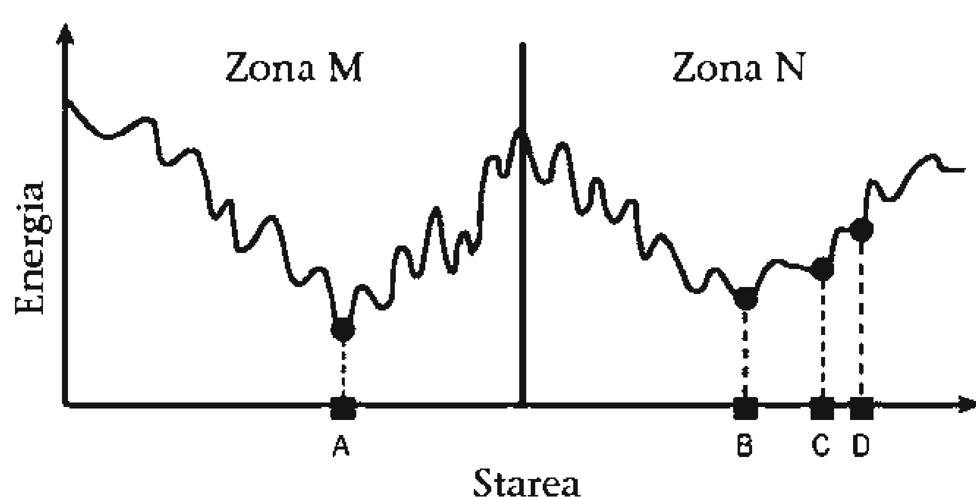


Figura 9. Două zone largi și adânci în care poate evolua sistemul.

Sistemul va evolua deci în interiorul unei regiuni, adică al unei mulțimi de configurații care au fost selecționate de istoria sistemului,

adică de regiune, printre foarte multele posibilități în care sistemul s-a aflat când a scăzut temperatura.

În mod normal, un sistem fizic se află într-o singură stare. De exemplu, apa, la o anumită temperatură și la o anumită presiune, e ori lichidă, ori gaz. Există cazuri particulare în care sistemul se poate afla în două stări care, de obicei, sunt numite faze. La 100° C, apa poate fi simultan în faza lichidă și în cea gazoasă. Există și o singură valoare a presiunii și temperaturii la care apa se găsește în toate trei fazele: solidă, lichidă și gazoasă. E faimosul „punct triplu“ al apei, și nu întâmplător e faimos. Într-adevăr, în general, un sistem se află într-o singură fază. Un sistem dezordonat, la temperatură joasă, se află, în schimb, simultan într-un mare număr de faze. Iată sensul parametrului de ordine care devine funcție, adică o mulțime de valori infinită.

Înțelegerea acestui fapt a fost un adevărat pas înainte pentru fizică. Construcția unui model sintetic și soluția lui ne-au îngăduit să descoperim un fenomen a cărui existență nici nu o bănuiam: am deschis larg poarta către lumea sistemelor dezordonate.

Pornind de la interpretarea fizică s-a reușit și interpretarea matematică. Pentru demonstrația matematică a fost nevoie de peste douăzeci de ani, iar lucrările lui Francesco Guerra și colaboratorii săi au fost fundamentale ca să-i dea de cap. Argumentele folosite în demonstrație sunt cu adevărat ingenioase în simplitatea lor; dar a posteriori totul pare simplu.

De la model la realitate

Soluția găsită pentru sticlele de spin e un bun punct de plecare pentru studiul adevăratei sticle, aceea folosită la ferestre, al cărei comportament încă nu are o

înțelegere fizică completă. Lucrez, cu intermitențe, încă de la mijlocul anilor nouăzeci, la o descriere care să ne permită înțelegerea tuturor aspectelor tranzițiilor sticlei.

La fel ca sticlele de spin, și sticla reală e un sistem dezordonat; dezordinea e datorată faptului că sticla nu e formată numai din siliciu, ci și din multe impurități, multe molecule de diferite tipuri, de diferite dimensiuni, amestecate una cu alta. Astfel că sticla nu poate cristaliza, pentru că doar structurile regulate cristalizează. Dezordinea aliajelor metalice numite sticle de spin e, așa cum am văzut, efectul dispunerii întâmplătoare a atomilor de fier în interiorul aurului: când metalul e lichid, atomii de fier se pot mișca la întâmplare în aur, dar când aliajul se răcește, atomii de fier se mișcă din ce în ce mai puțin și rămân blocați în poziții întâmplătoare.

Acum, când încercăm să ajungem la înțelegerea concretă a proceselor

reale, toate acestea par teribil de complicate, dar, când vom fi încheiat lucrarea, totul va părea simplu. Când studiem o teorie fizică sau o teoremă matematică într-o carte, totul pare extrem de clar. A dispărut complet întreaga muncă dificilă și complicată care a fost necesară pentru obținerea rezultatului.

O altă problemă interesantă e trecerea de la modelul schematic, ca acela al sticlelor de spin abia descris, la un model mai realist în care forțele dintre spini să fie descrise mai amănunțit, ținând cont, de exemplu, de distanța reciprocă dintre spini.

Tranziția de fază survine prin intermediul schimbului de interacțiuni între obiecte care au o deplasare spațială precisă, lucru de care nu se ține seama în modelul simplificat discutat înainte.

Modelul simplificat nu ignoră doar structura spațială, el nu ia în seamă nici evoluția temporală.

Tehnicile din mecanica statistică sunt „ușor“ de folosit când sistemul studiat e în echilibru, adică atunci când e stabil în timp. Pentru un sistem dezordonat, ca sticla sau ceara, timpul necesar atingerii echilibrului e, în general, foarte mare: poate fi de ordinul anilor sau secolelor. E valabil și pentru sticla ferestrelor noastre, pentru care totuși se folosesc anumite tehnici industriale care să o facă mai rigidă.

Dacă un proces fizic nu se află în stare de echilibru, atunci există o săgeată a timpului, pentru că se poate distinge un înainte și un după, ceea ce nu se întâmplă în cazul sistemelor în echilibru.

Banalizând un pic, dacă o minge se află în stare de echilibru stabil, adică se oprește în fundul unei văi, și îi facem mai multe fotografii, n-o să fim niciodată în stare să le punem în ordinea cronologică în care au fost făcute, dat fiind că situația nu prezintă niciun semn de schimbare.

Lucrurile se schimbă însă dacă fotografiem o minge care se rostogolește în jos: într-o situație de neechilibru, secvența temporală e evidentă.

Avem deci problema extinderii teoriei în timp, dată fiind situația de neechilibru, și a extinderii ei în spațiu, pentru că procesele se desfășoară în spațiu și interacțiunile au loc între particule vecine. În concluzie, e încă mult de muncit pentru a înțelege până la capăt tranzițiile sticlei.

Lărgirea perspectivei

Plecasem de la ideea de a controla o tehnică matematică ce mi-ar fi fost de folos la o problemă de particule elementare (și, pentru acea problemă, tehnica replicării, în versiunea sa originală, funcționează de minune) și m-am trezit că am un instrument matematic și conceptual foarte puternic și util în rezolvarea unei plaje întinse de probleme

aparent chiar fără legătură între ele: problemele referitoare la sistemele dezordonate.

Lumea reală e dezordonată și, după cum am spus încă de la început, multe situații din lumea reală pot fi descrise de un număr mare de agenți elementari care interacționează între ei.

Interacțiunile se pot schematiza cu reguli simple, dar rezultatele acțiunii colective pot fi cu adevărat neașteptate.

Entitățile elementare pot fi spini, atomi sau molecule, neuroni, celule, în general, dar și situri web, agenți de bursă, acțiuni și obligații, persoane, animale, componente ale unor ecosisteme și așa mai departe...

Nu toate interacțiunile dintre entitățile elementare generează sisteme dezordonate. Dezordinea apare pentru că unele entități elementare se comportă altfel decât celelalte: unii spini încearcă să se alinieze în sens opus celorlalți, unii

atomi sunt diferiți de majoritatea celorlalți, anumiți operatori financiari vând acțiuni pe care alții le cumpără, unii dintre invitații la o cină antipatizează pe câte unul dintre ceilalți oaspeți și vor să stea mai departe de el...

Iată, în toate aceste cazuri dezordonate, instrumentul matematic și conceptual găsit de mine e indispensabil pentru a putea aborda problema.

În ultima vreme, de exemplu, s-a ajuns la rezultate importante în tentativa de rezolvare a problemei aranjării într-o cutie a numărului maxim de sfere solide de dimensiuni diferite. E o problemă foarte interesantă, pentru că sferele solide de dimensiuni diferite sunt folosite la construcția modelelor pentru lichide, cristale, sisteme coloidale, sisteme granulare și pulberi. În plus, „împachetarea“ sferelor solide e corelată cu probleme importante de teoria informației și de optimizare.

Simplificarea fenomenelor e un instrument extrem de puternic în studiul naturii. Cel care l-a găsit a fost Galileo Galilei. A construit o teorie în care frecarea era complet neglijată: țineți seama că într-o lume fără frecare nu am putea nici merge (am aluneca), nici mânca (mâncarea ar cădea din farfurii). Lumea galileiană din care s-a născut fizica modernă e cu totul diferită de lumea reală; apoi, odată cu trecerea secolelor, s-au tot adăugat alte elemente, până când lumea aceea a devenit, în zilele noastre, o aproximare satisfăcătoare a lumii reale. Acest punct de vedere e excelent redat într-un fragment foarte frumos despre mișcarea corpurilor dintr-o scrisoare a lui Evangelista Torricelli.

„Prea puțin mă interesează dacă principiile doctrinei *de motu*[5] sunt adevărate sau false. Pentru că, dacă nu sunt adevărate, să ne prefacem că

sunt adevărate, așa cum am presupus, iar apoi să luăm toate celelalte speculații deduse din ele nu ca pe niște lucruri adevărate, ci pur geometrice. Eu mă prefac sau presupun că un anume corp sau punct se mișcă în sus și în jos cu proporția știută și pe orizontală, cu aceeași mișcare [adică, în limbaj modern, «se mișcă în absența frecării atmosferice»]. Dacă așa se întâmplă, eu spun că se va întâmpla și tot ce a spus Galileo și am spus chiar și eu. Dacă, apoi, bilele de plumb, de fier, de piatră nu respectă această presupusă proporție, cu atât mai rău pentru ele: vom spune că nu despre ele vorbim."

Pentru Torricelli, însă, care era și un desăvârșit fizician experimentalist, era clar că înțelegerea mișcării corpurilor în absența frecării era preliminară înțelegerii fenomenelor cu frecare, fiind deci un pas obligatoriu.

Plecând de la capacitatea de a reduce fenomenele fizice la esențial, oamenii au dezvoltat fizica ultimelor secole. Iar fizica a devenit atât de puternică și bogată, încât acum e în stare să introducă în modelele ei complexitatea și dezordinea, adică exact ce Galileo fusese constrâns să excludă.

---

4 „Mijlocul calculelor". Aluzie la primul vers din *Infernul* lui Dante: „In mezzo del cammin di nostra vita". (*N.t.*)

5 Se referă la *De Motu Antiquiora* (cunoscută și ca *De Motu*), cartea lui Galileo Galilei despre mișcarea corpurilor. Fragmentul face parte dintr-o scrisoare către Michelangelo Ricci, din 10 ianuarie 1646. (*N.t.)*

Schimb de metafore între fizică și biologie

Un singur neuron nu face o memorie, dar mulți neuroni, da. La fel și cu cărămizile: una e știința unei singure cărămizi și altceva e arhitectura.

Știința se bazează pe dovezi experimentale, pe demonstrații analitice, pe teoreme. La baza construcției științifice stă însă o mare constelație de raționamente intuitive. Și în științe, la fel ca în arte sau în atâtea alte activități umane, întâi vine intuiția, abia apoi se ajunge la certitudini. Există două exemple emblematice.

Când Enrico Fermi și colaboratorii lui au descoperit că neutronii încetiniți erau cu mult mai eficienți la inducerea transmutării radioctive

a multor elemente, cheia descoperirii a fost, la începutul experimentului, înlocuirea unei cărămizi de plumb ce servea la ecranarea neutronilor cu o cărămidă de parafină. Fermi a acționat impulsiv, fără să gândească, iar consecința acestei schimbări a fost observarea unei creșteri impresionante a semnalului în contoarele de radioactivitate (de peste o sută de ori). Amaldi, Pontecorvo, Rasetti și Segré au rămas cu gura căscată: Fermi le-a explicat imediat că parafina încetinise neutronii, iar neutronii lenți trebuie că erau mult mai eficienți decât cei rapizi. Iar când Amaldi l-a întrebat: „Cum de ți-a trecut prin minte să pui parafină în loc de plumb?", Fermi a răspuns: „A fost intuiția mea formidabilă".

Colegul meu de la Accademia dei Lincei, Claudio Procesi, susține că diferența dintre un matematician bun și unul slab e că acela bun înțelege imediat care sunt afirmațiile

matematice adevărate și care sunt cele false, în timp ce unul slab trebuie să încerce să le demonstreze ca să vadă care sunt adevărate și care sunt false.

În ambele exemple, intuiția e extrem de importantă, instrumentele folosite depășind cu mult logica formală. E deci foarte interesant de studiat raționamentele intuitive care stau la baza progresului științific — ca metaforele, de exemplu, care au un rol decisiv în transferul de imagini și idei între discipline diferite, în aceeași perioadă istorică.

Dacă examinăm atent o perioadă istorică, putem percepe un spirit al timpului: adesea, suntem în stare să găsim corespondențe și asonanțe nu doar între discipline științifice diferite, cum ar fi biologia, fizica și așa mai departe, dar chiar între muzică, literatură, arte și știință. E de ajuns să ne gândim la criza unui anumit raționalism de la începutul secolului XX, la schimbările

simultan apărute în pictură, în literatură, în muzică, în fizică, în psihologie... Toate aceste discipline, atât de depărtate una de cealaltă, comunică totuși între ele și e firesc să presupunem că metaforele au un rol important în formarea sensibilității comune.

Din păcate, în știință, în general, și, cu deosebire, în științele „dure“, foarte rar se regăsesc urmele pașilor intermediari necesari pentru obținerea unui rezultat și nu mai putem ști ce anume i-a inspirat unui om de știință o anumită idee, deoarece — mai ales în matematică, dar și în fizică și în alte discipline științifice — considerațiile extraștiințifice nu se păstrează în formularea scrisă a articolelor și cărților. Textul scris e complet epurat, redat într-un limbaj formal în care rareori apar aluzii la argumente netehnice. Rămâne uneori ceva din argumentația paraștiințifică în texte de natură mai

generală (în cele ale lui Poincaré, de exemplu), în care aflăm raționamente metaștiințifice, dar în aproape totalitatea textelor scrise de oamenii de știință, aceste teme sunt tabu.

Probabilitatea

În timp ce căutam un exemplu concret de posibil transfer de idei între discipline diferite, am început să reflectez la folosirea probabilității în științe. Unul dintre primele domenii în care se utilizează probabilitatea, dincolo de jocurile de zaruri și de cărți, e statistica — știința statelor, după cum îi spune chiar numele —, iar în secolul al XIX-lea au și fost mulți economiști și sociologi, ca Adolphe Quetelet, cu contribuții foarte importante în statistică și în calculul probabilităților. Între timp, în a doua jumătate a secolului al XIX-lea, Maxwell și Boltzmann au introdus — în mod independent, se pare —

probabilitatea și statistica în fizică, la nivel microscopic, în scopul înțelegerii fenomenelor colective (exact ce voiau și economiștii). În aceiași ani e formulat mecanismul de selecție darwiniană: caracterele genetice suferă mutații întâmplătoare, apoi caracterele modificate sunt selecționate. Pentru Darwin, punctul-cheie al teoriei evoluției îl reprezintă conceptul de selecție între mai multe posibilități diferite.

Odată cu redescoperirea lui Mendel, la începutul secolului XX, substratul fizic asupra căruia operează evoluția se identifică cu genele; teoria darwiniană devine paradigma dominantă în biologie. E impresionant să observăm că, dacă ne uităm la un domeniu extrem de îndepărtat de biologie, anume la mecanica cuantică, interpretarea școlii de la Copenhaga (sfârșitul anilor douăzeci) prezintă multe asemănări cu teoria darwiniană; un

sistem cuantic se poate afla în mai multe stări diferite, iar experimentul (sau observația) selecționează la întâmplare una dintre diferitele posibilități.

Atât în teoria darwiniană, cât și în mecanica cuantică, evoluția (biologică și fizică deopotrivă) trece prin propunerea unor noi posibilități și printr-o selecție succesivă. E limpede că detaliile sunt fundamental diferite: în evoluția naturală, noile posibilități apar în mod întâmplător, iar alegerea e deterministă (*supraviețuirea celui mai apt*), în timp ce în mecanica cuantică, starea evoluează determinist, iar măsura alege aleator între diferitele posibilități de finalizare a experimentului. Dar dincolo de diferențe există asemănări puternice între cele două modalități: e posibil ca Niels Bohr, Max Born și ceilalți exponenți ai școlii de la Copenhaga, tot auzind vorbindu-se despre teoria darwiniană a evoluției,

să fi fost cumva influențați de ea. Din păcate, în lucrările tehnice cele mai cunoscute și traduse în engleză nu găsim nimic de felul acesta. Nefiind istoric, nu pot jura că ei nu vorbesc despre o atare influență în vreo scriere mai puțin cunoscută, dar e posibil și ca autorii înșiși să nu-și fi dat seama în ce măsură i-a influențat Darwin și să nu fi pomenit nicăieri despre asta.

Riscurile metaforelor

Trebuie să facem o distincție foarte clară între folosirea metaforei ca instrument euristic și folosirea metaforei, a asemănării și a altor figuri retorice ca bază a unui raționament până la a ajunge la punctul extrem în care logica e înlocuită de retorică. Acest al doilea mod de a proceda mi se pare pernicios; sunt transpuse într-un limbaj diferit concepte care nu pot fi traduse în acel limbaj, deformându-le chiar fără să băgăm de seamă; nu e

nicio mirare că adesea se ajunge la concluzii complet arbitrare. Uneori, așa se nasc monștri, cum e sociobiologia, în care argumentații și metafore biologice sunt translatate fără niciun control în domeniul social, căruia, de fapt, nu i se aplică, deoarece în acest domeniu ipotezele implicit subînțelese nu sunt defel corecte. Așa se poate ajunge la concluzii periculoase, folosite de politicieni pentru a justifica teorii aberante, ca darwinismul social.

Folosirea aceasta dezinvoltă a metaforei e obișnuită uneori în anumite sectoare umaniste, cu rezultate la fel de negative, chiar dacă nu atât de periculoase. Mi-e greu să nu vorbesc aici despre celebra cacealma a lui Sokal. Ca să pună la zid demersurile pseudofilosofice și pseudoștiințifice, fizicianul american Alan D. Sokal a scris un articol folosind stilul metaforic al unor intelectuali precum Lacan, Derrida și mulți alții. Articolul (*Transgressing the*

Boundaries: Toward a Transformative Hermeneutics of Quantum Gravity)[6] se baza pe o serie de metafore fizice, sociologice și psihologice atât de fără noimă, încât, dacă Sokal le-ar fi formulat crezând în ele cu adevărat, toți colegii l-ar fi considerat nebun. Știind perfect că nimic din ce scrisese nu avea sens, Sokal a construit o serie de comparații nebunești, cu un aparat critic încărcat, respectând stilul academic căutat. În mod incredibil, articolul a fost acceptat de comitetul de redacție și publicat în una dintre prestigioasele reviste din domeniu (*Social Text*). Scandalul a izbucnit când Sokal a declarat public că a scris ceva absurd: stânjeneala a fost enormă, până-ntr-atât, încât cineva a încercat să se justifice susținând chiar că textul lui Sokal avea probabil un sens dincolo de intențiile autorului. Articolul se poate găsi pe internet: e foarte amuzant și cine înțelege partea fizică a metaforelor nu poate decât să

admire imaginația aproape inepuizabilă a autorului.

În ciuda abuzurilor subliniate de Sokal, metaforele au un rol foarte important în comunicarea științifică, atunci când explicăm unor profani o descoperire. Adesea însă metaforele își fac din nou apariția în limbajul comun într-o manieră atât de imprecisă, încât ajung să fie greu suportabile. E cât se poate de natural ca metaforele să nu fie convingătoare: se întâmplă în mod obișnuit când cuvintele unui limbaj sunt folosite într-un altul în care au o semnificație diferită. Chiar dacă de înțeles, fenomenul tot îi enervează — și nu puțin — pe oamenii de știință.

Găsesc deosebit de obositoare expresii de tipul: „E scris în ADN-ul stângii". De fiecare dată când o aud, nu pot să nu mă gândesc că ADN-ul e baza transmiterii genetice a caracterelor, o transmitere darwiniană, în timp ce cultura se

transmite în mod complet diferit, prin intermediul caracterelor dobândite, transformări care trec, în mod lamarckian, din tată-n fiu. Să-ți imaginezi că o cultură se poate transmite prin ADN contrazice violent principiile de bază ale teoriei evoluției.

Matematicienii, în schimb, sunt iritați de folosirea neglijentă a cuvântului „teoremă"; în jurnalismul politic, cuvântul a devenit sinonimul raționamentului arbitrar, adesea făcut de un judecător. Pentru un jurnalist, o teoremă e o teză corectă din punct de vedere formal, dar construită plecând de la ipoteze greșite, un silogism înțeles ca raționament înșelător. Nu greșesc pe de-a-ntregul jurnaliștii: uneori, și câte-un om de știință pleacă de la ipoteze inadecvate (de exemplu, „să presupunem calul sferic") și apoi, cu un raționament matematic, ajunge la concluzii greu de crezut pe care le prezintă drept teoreme. Acum

matematica e o metodă corectă din punct de vedere formal, iar o teoremă afirmă în mod corect că din anumite ipoteze urmează anumite consecințe; nu e de mirare că, plecând de la ipoteze neadevărate, se ajunge la concluzii neadevărate. Problema e că adesea ipotezele sunt false, dar bine ascunse și deloc ușor identificabile, iar rezultatele, false și ele, sunt proclamate ca fiind adevărate întrucât sunt consecințele unei teoreme. Asemenea cazuri sunt foarte obișnuite, de la argumentațiile sfârșitului secolului al XIX-lea, în care se demonstra că un avion nu poate zbura, sau că teoria darwiniană a evoluției era greșită, deoarece vârsta Pământului era de cel mult douăzeci de milioane de ani. Unele exemple de raționamente înșelătoare au devenit celebre și tocmai la acest tip de „teoreme“ face aluzie metafora.

În fizică, pe de altă parte, metaforele sunt adesea folosite în situații de criză, în discuții metaștiințifice îndârjite, când nu e limpede care trebuie să fie legile fizice. Să dăm câteva exemple.

Lui Einstein mecanica cuantică nu i se părea satisfăcătoare, chiar dacă el contribuise mai mult decât oricine altcineva la nașterea ei: pentru el, „mecanica cuantică nu era adevăratul Iacob". Einstein contesta mai ales interpretarea de la Copenhaga în care probabilitatea juca un rol fundamental: teoria fizică *trebuia* să fie deterministă. Așa a apărut celebra lui frază „Dumnezeu nu joacă zaruri", căreia, se zice, Bohr i-ar fi răspuns: „Einstein, încetează să-i mai spui lui Dumnezeu ce să facă sau să nu facă".

La sfârșitul anilor cincizeci s-a descoperit că interacțiunile slabe (cele responsabile de dezintegrarea radioactivă) nu păstrează paritatea:

altfel spus, privind înregistrarea unui experiment asupra interacțiunilor slabe, putem înțelege dacă înregistrarea redă imaginea corectă sau pe una oglindită, în care dreapta a fost înlocuită cu stânga. Rezultatul era cu totul neașteptat, întrucât celelalte forțe ale naturii nu disting dreapta de stânga. Nedumerirea a fost mare și bine rezumată în fraza lui Pauli: „Nu mă miră atât de mult că Dumnezeu e stângaci, ci că Dumnezeu e doar un slab stângaci".

Uneori, e greu de înțeles dacă anumite raționamente sunt metafore sau chiar încearcă să aibă o semnificație ontologică. În secolele al XVII-lea și al XVIII-lea, fizica era dominată de mecanicism: orice lege fizică trebuia explicată în termeni de mașini, uneori invizibile sau microscopice. Mașinile acționau prin intermediul interacțiunilor dintre piese. În acest cadru conceptual, acțiunile la distanță erau absolut indigeste. Newton însuși, când a

propus legea gravitației universale (care presupune interacțiunea la distanță între corpurile care se atrag din cauza gravității, chiar în lipsa atingerii; mai mult, pot fi foarte depărtate, ca planetele în jurul Soarelui), s-a descurcat spunând *hypotheses non fingo*[7], presupunând implicit că, mai târziu, aveau să vină alții care să înțeleagă care a fost modelul mecanic pe care se baza totul.

Ca forță care acționează la distanță, gravitația a rămas un scandal mai bine de un secol, cu toate că mulți au încercat să-i găsească o explicație mecanicistă. În una dintre încercări (poate cea mai ingenioasă) se presupunea că spațiul ar fi plin cu o radiație omniprezentă, iar obiectele ar fi împinse de această radiație. În mod normal, radiația vine din toate părțile, iar forțele induse se compensează; când două obiecte sunt apropiate, unul îl umbrește pe celălalt și radiația le

împinge tinzând să le apropie, și asta ar fi originea forței de gravitație. Mecanicismul de bază a supraviețuit până la începutul secolului XX: vidul a devenit un mediu mecanic (eterul) ale cărui oscilații au fost interpretate drept cauza câmpurilor electrice și magnetice.

Metafore, modele și analogii

Găsim și în biologie metafore persistente care au jucat un rol important. În secolul al XVII-lea, de exemplu, organismul era văzut ca o mașină cu piese foarte mici, atât de mici, încât nu puteau fi văzute. În a doua jumătate a secolului trecut, după descoperirea rolului fundamental al informației codificate în ADN, a apărut metafora computerului: *hardware*-ul e aparatul proteic, iar *software*-ul e în ADN. Metafora (software/ADN și hardware/proteine) s-a bucurat de un succes enorm, pentru că avea o mare putere explicativă și rezuma bine

stadiul cunoștințelor din epocă. Ulterior, lumea și-a dat seama că interacțiunea dintre proteine și ADN era mult mai complexă: ADN-ul însuși se automodifică și, treptat, descoperirile succesive au făcut ca metafora să devină desuetă, chiar dacă e încă mult folosită.

În biologie, avem acum metafore noi. Unele, de pildă, se bazează pe complexitate, pe ideea că, în prezența unui mare număr de agenți care interacționează (molecule, gene, celule, animale, specii, în funcție de nivelul discuției), se înregistrează fenomene noi care apar ca efect al interacțiunii colective. Tendința e deci de deplasare a accentului pe aceste fenomene și, pentru a explica aceste comportamente, se folosesc idei și metafore împrumutate din fizică. Printre multe idei importante, se detașează rețelele (cele metabolice, de exemplu) sau geometria fractală (folosită pentru studiul plămânilor,

al ramurilor copacilor sau al structurii conopidelor).

În fizică e caracteristică folosirea masivă a modelelor, iar modelele sunt un tip de metafore. M-a frapat o discuție între Giovanni Jona-Lasinio și Tommaso Castellani despre rezistența fizicienilor la metafore și despre tendința lor de a le demonta. Sintetizând, Jona afirmase că a compara valurile mării cu spicele de grâu care se unduiesc nu e o metaforă, întrucât ecuațiile care descriu valurile mării sunt asemănătoare celor care descriu mișcarea spicelor: în ultima analiză, cele două reprezintă același fenomen, unul nu e metafora celuilalt. Dimpotrivă, Castellani observa că, pentru cea mai mare parte dintre oameni, unduitul spicelor și valurile mării par două fenomene diferite în mod intrinsec.

De unde vine tendința fizicienilor de a demonta metaforele? Ca să răspundem, trebuie să reflectăm la ce

fel de știință e fizica și la felul în care se poziționează aceasta față de matematică și de alte științe ale naturii. Fizicianul poate fi considerat un matematician aplicat. Pleacă de la o problemă concretă și o mută în limbajul fizicii, care, de la Galilei încoace, e matematica. Se întâmplă ca fizicianul să folosească matematica neglijându-i gramatica, dar, așa cum a spus Jona, a nu respecta în totalitate regulile gramaticale e o licență permisă poeților.

Dar ce e, până la urmă, matematica? E o știință care operează cu simboluri curățate de orice semnificație concretă; cum spune Bertrand Russell, „matematica e acea știință care nu știe despre ce vorbește". Motivul e simplu: când afirmăm că 2 + 3 fac 5 — pot fi 2 apeluri telefonice + 3 apeluri telefonice care fac 5 apeluri telefonice, sau 2 vaci + 3 vaci care fac 5 vaci —, habar nu avem ce sunt res-

pectivele 5 „obiecte“. Acest lucru este valabil la un nivel de abstracție extrem de scăzut și devine din ce în ce mai relevant pe măsură ce avansăm către concepte mai abstracte. Obiectele matematice sunt epurate de orice aparență sensibilă, așadar propozițiile matematice, ca și propozițiile logice, au valență universală.

Fizicianul, în schimb, traduce fenomenele concrete într-un limbaj matematic în care multe dintre caracteristicile lor concrete se pierd, rămânând doar acelea esențiale pentru studiul fenomenului. Oscilațiile spicelor și valurile mării sunt descrise de ecuații foarte asemănătoare: după ce au fost reprezentate prin aceeași ecuație, una nu mai reprezintă metafora celeilalte, ci amândouă devin încarnări fizice ale aceleiași reprezentări matematice. În realitate, ecuațiile spicelor și ale valurilor mării nu sunt riguros aceleași, dar fac parte din aceeași

familie, adică ambele admit propagarea undelor. În cazul spicelor, viteza de propagare a undelor e independentă de lungimea de undă — distanța dintre două unde succesive —, în timp ce în cazul valurilor mării, viteza e proporțională cu rădăcina pătrată a lungimii de undă, de aceea valurile tsunami, care sunt extrem de lungi, se deplasează cu mare viteză.

Cross-fertilization[8]

Pentru fizicieni, a fost extrem de importantă — o spune și Jona — descoperirea faptului că sisteme complet diferite au aceeași descriere matematică. Uneori însă ecuațiile sunt aceleași, dar diferă expresiile matematice care corespund cantităților observabile. În acest cel mai interesant caz, comportamentele observate ale celor două sisteme pot fi foarte diferite; pot chiar aparține unor domenii complet diferite din fizică (de exemplu, fizica solidului și

fizica particulelor elementare), iar convergența lor către o aceeași reprezentare matematică poate fi o surpriză cu totul neașteptată.

Adeseori, momentul în care lumea își dă seama că două domenii foarte diferite ale fizicii pot fi circumscrise aceleiași structuri matematice reprezintă începutul unei acumulări rapide de cunoștințe, dat fiind că cele două domenii se fertilizează reciproc. Dacă cele două sisteme au fost bine studiate, mulțimea de rezultate și tehnici obținute în unul dintre ele se pot aplica (după o traducere potrivită) celui de-al doilea. În general, când un același sistem matematic formal are două realizări fizice complet diferite, în ambele sisteme se poate folosi intuiția fizică pentru a obține informații complementare prețioase.

Într-o lucrare din 1961, scrisă în colaborare cu Yoichiro Nambu, Jona descria o analogie între vidul cuantic și superconductivitate. Folosirea

cuvântului „analogie“ e bine datată. Între jumătatea anilor șaizeci și anii șaptezeci, s-a observat că structura vidului cuantic și calculul proprietăților statistice ale unui material sunt aspecte diferite ale aceleiași probleme matematice. Informațiile provenite din experimente făcute asupra metalelor (știm, de exemplu, că anumite materiale sunt superconductoare) ne deschid ochii asupra unor comportamente posibile ale vidului cuantic. Începând cu anii optzeci, cuvântul „analogie“ a dispărut, folosindu-se în schimb o expresie de tipul „conjecturăm că vidul cuantic e supraconductor“.

Relația dintre mecanica statistică a materialelor și fizica cuantică a particulelor elementare a fost cu adevărat importantă. Exemplul cel mai strălucit al acestei relații este, poate, teoria inițiată de Gianni Jona și Carlo Di Castro, primii care au aplicat grupul de renormalizare în

studiul tranzițiilor de fază. Într-adevăr, așa cum am văzut, grupul de renormalizare, dezvoltat în cadrul teoriei cuantice și relativiste a câmpurilor, și toate tehnicile înrudite din acel context au fost aplicate cu enorm succes mecanicii statistice a fenomenelor critice (dovedit de premiul Nobel acordat lui Ken Wilson). Tehnicile bazate pe grupul de renormalizare au fost cruciale pentru înțelegerea fenomenelor critice și au fost apoi retranspuse în fizica particulelor elementare; în timpul călătoriei dus-întors, s-au îmbogățit cu idei noi și cu o nouă înțelegere fizică a fenomenelor și abia din acel moment grupul de renormalizare a început să aibă un rol fundamental în fizica particulelor elementare.

Nu cred că în asemenea cazuri putem vorbi despre metaforă: această *fertilizare încrucișată* este cât se poate de diferită de figurile retorice tradiționale; aceeași abstracțiune

matematică se poate proiecta asupra unor sisteme fizice diferite și fiecare dintre aceste perspective ne dezvăluie altfel de aspecte. Să luăm, de exemplu, sistemele complexe, sistemele compuse din mulți agenți. Uneori, același model matematic poate fi aplicat la studiul comportamentului unor sisteme magnetice exotice la temperaturi joase (sticlele de spin), la funcționarea creierului, la comportamentul grupurilor mari de animale și la economie. Într-un asemenea caz, folosirea concluziilor trase în studiul unuia dintre domenii pentru a face predicții în alt domeniu nu e tocmai un recurs la metaforă, pentru că e vorba despre sisteme cu formalizare matematică asemănătoare. E, mai degrabă, o tentativă de a transpune concepte dintr-o disciplină în alta, tentativă justificată de consonanța ambelor cu aceleași structuri matematice.

În concluzie, am început să caut metafore, dar apoi a învins în mine dispoziția naturală a fizicienilor de a le demonta. Sper măcar că am reușit să explic cât mai clar originea acestui demers. Știu că m-am îndepărtat de temă, dar uneori știi doar de unde pleci, nu și unde vei ajunge.

---

[6] Transgresând frontierele: către o hermeneutică transformativă a gravitației cuantice — în engl. (*N.t.*)

[7] Nu avansez nicio ipoteză — în lat. (*N.t.*)

[8] Fertilizare încrucișată — în engl. *(N.t.)*

Cum se nasc ideile

În cercetare, întrebările care apar pe măsură ce avansăm sunt mai multe decât răspunsurile pe care le putem obține.

De unde vin ideile? Cum se formează ele în mintea unui fizician teoretician ca mine, de exemplu? Ce fel de procedee logice utilizăm? Nu mă refer numai la marile idei, acelea care schimbă istoria umanității, istoria gândirii; dimpotrivă, aș vrea să vorbesc despre ceea ce s-a numit „microcreativitate“, adică micile idei de zi cu zi care sunt cruciale pentru ca știința să progreseze. Pentru mine, o idee e un gând neașteptat, surprinzător, deloc banal.

Aș vrea să pornesc de la Henri Poincaré și Jacques Hadamard. Cei doi matematicieni, care au trăit la

cumpăna secolelor al XIX-lea și XX, au descris în mod repetat felul în care luau naștere ideile lor matematice și au puncte de vedere asemănătoare. Amândoi afirmă că, în demonstrarea unei teoreme de matematică, se pot identifica mai multe faze.

- Există o primă fază de pregătire, în care se studiază problema, se citește literatura științifică, se fac primele încercări nereușite de a găsi o soluție. După o perioadă ce poate fi cuprinsă între o săptămână și o lună, cum nu s-au înregistrat progrese, faza e încheiată.
- Urmează apoi o perioadă de incubație, în care problema e abandonată (cel puțin în mod conștient).
- Incubația se termină brusc cu un moment de *iluminare*; adeseori, aceasta se produce într-o situație fără legătură cu problema

respectivă, de exemplu, în timpul unei discuții cu un prieten, poate chiar despre chestiuni depărtate de problemă.

- La sfârșit, după iluminarea care indică liniile generale pe care se poate ataca problema, urmează demonstrația propriu-zisă. Aceasta poate fi o perioadă foarte lungă: trebuie verificat că iluminarea a fost corectă, că drumul poate fi cu adevărat parcurs, trebuie trecut prin toți pașii matematici necesari pentru a explicita demonstrația.

Evident, există cazuri în care iluminarea se dovedește greșită: presupune validitatea unor pași imposibil de demonstrat. Iar atunci trebuie luat totul de la capăt.

Descrierea e foarte interesantă și sugerează că gândirea inconștientă are un rol covârșitor. Și Einstein era de acord cu asta: într-adevăr, cu mai

multe prilejuri, a subliniat că pentru el raționamentul inconștient era foarte important. Nu există niciun dubiu că a lăsa deoparte o problemă grea e un procedeu foarte comun: lași ideile să se *sedimenteze,* te pregătești s-o abordezi cu mintea proaspătă și s-o rezolvi. Proverbul „Noaptea e un sfetnic bun" apare în foarte multe limbi: *Consiliis nox apta*; *Night is the mother of counsel*; *Die Nacht bringt Rat*; *Il est utile de consulter l'oreiller*; *Antes de hacer nada, consúltalo con la almohada* (*oreiller* și *almohada* înseamnă „pernă"); *La note xe la mare d'i pensieri*.

Trecând de la marile probleme la cele mai banale, aș vrea să vă povestesc o experiență personală. De multe ori, în munca mea de cercetare în fizică, sunt nevoit să scriu programe pe computer, activitate pe care o găsesc amuzantă și relaxantă. Computerul e o mașină cu totul lipsită de bun-simț, așa că face exact ce-i spui să facă și se limitează cu o

precizie exasperantă la semnificația literală. Când vorbești cu o ființă umană și îi spui să o ia pe cutare stradă și apoi s-o țină tot înainte, din fericire, n-o să pornească de pe stradă la prima curbă; în schimb, un computer exact asta ar face, în modul cel mai natural, dacă n-ai fost suficient de precis în a explica ce înțelegi prin „tot înainte“.

Oricât te-ai strădui, foarte adesea se întâmplă ca prima dată să-i ceri computerului ceva diferit în mod subtil de ceea ce vrei cu adevărat să facă. Adesea, un program nou, scris într-unul dintre multele limbaje de programare, nu funcționează: la teste simple dă rezultate complet diferite de cele așteptate (cel puțin asta e experiența mea: evident, cu cât un programator e mai bun, cu atât trage la fix de prima dată).

Mi s-a întâmplat de nenumărate ori să mă lupt o dimineață întreagă ca să încerc să înțeleg ce greșeală am făcut: citeam atent programul,

reflectam la fiecare instrucțiune, una după alta, mă întrebam dacă pusesem bine virgulele, dacă nu lipsea vreun punct și virgulă, dacă nu era vreun egal în plus sau în minus, și nu reușeam să-i dau de cap. Apoi, în mașină, în drum spre casă, pe la jumătatea drumului, îmi venea ideea: „Uite unde greșesc!“, și odată ajuns acasă verificam că într-adevăr asta era.

E o situație foarte obișnuită. Am trecut însă o dată — doar o singură dată în toată viața — printr-un episod de aceeași natură, dar mult mai spectaculos. Împreună cu alți colegi, ne luptam cu o problemă foarte dificilă; încercaserăm să înțelegem care era strategia potrivită, dar fără niciun succes. Multă vreme (zece–cincisprezece ani) s-au tot propus diferite aproximări: am lucrat și eu la problema asta, dar o abandonasem pentru că mi se părea prea grea. Într-o zi însă, la prânz, în timpul unui congres, un prieten îmi

spune: „Știi, problema la care ai lucrat e foarte interesantă, pentru că soluția ar avea o serie de aplicații dincolo de ce se credea odată“. „Atunci ar merita făcut efortul de-a o rezolva“, am răspuns, „poate că s-ar putea încerca...“ și i-am expus pas cu pas strategia de rezolvare, strategie care apoi s-a dovedit cea corectă.

Gânduri și cuvinte

În episoadele descrise recunoaștem ușor exemple pentru procesul de incubație. Sunt convins că oricare dintre noi poate povesti întâmplări asemănătoare. Dar dacă incubația, indiferent de importanța problemei, e un proces inconștient, am putea să ne întrebăm de ce tip de logică ascultă și cum de apare. Suntem adesea convinși că gândirea e verbală, iar raționamentul inconștient nu e chiar gândire propriu-zisă. Einstein n-ar fi fost de acord; el susținea că a fi pe deplin conștient e un caz-limită, unul care

nu survine niciodată: gândirea conține întotdeauna o parte inconștientă.

Chiar nefiind expert în domeniu, îngăduiți-mi să vă prezint câteva păreri despre gândirea conștientă și despre cea inconștientă. Avem impresia că noi gândim folosind cuvintele, formulând fraze. Așa se întâmplă când vorbim cu alți oameni, ba chiar și când cugetăm în tăcere. Dacă cineva ne-ar cere să reflectăm la ceva fără a folosi cuvinte, ne-am trezi complet neputincioși: nu suntem în stare să rezolvăm problema în minte fără a formaliza raționamentele în cuvinte; pot fi cuvinte din orice limbă, dar trebuie să fie cuvinte.

Forma verbală însă nu poate epuiza modul în care gândim. Într-adevăr, când începem să gândim ori să spunem o frază, avem nevoie să știm către ce ne îndreptăm. Avem de respectat reguli gramaticale. Nu începem o frază cu cuvântul „nu" și-

apoi ne oprim, fără să mai știm ce să spunem, pentru că în momentul în care ne-a venit în minte cuvântul „nu“, știm deja care e verbul succesiv și, probabil, întreaga frază. Dar, dacă așa stau lucrurile, înseamnă că întreaga frază e prezentă în mintea noastră în formă nonverbală încă înainte de a fi pusă în cuvinte.

Formalizarea gândurilor prin intermediul cuvintelor e extrem de importantă; cuvintele sunt puternice, se înlănțuie și se atrag. Până la urmă, cuvintele au aceeași funcție ca și algoritmii în matematică. Așa cum algoritmul împinge înainte raționamentul matematic aproape de unul singur, la fel cuvintele își au viața lor, evocă alte cuvinte, ne permit să abstractizăm, să deducem, să folosim logica formală. Poate că formularea conștientă, în cuvinte, a gîndurilor e utilă și pentru a ține minte ce am gândit: dacă nu formalizăm gândurile prin cuvinte, ne-ar putea fi

mai greu să ni le amintim. Cu toate acestea, gândirea verbală trebuie să fie precedată de o gândire nonverbală. Afirmația aceasta nu e atât de stranie pe cât pare: în fond, din punct de vedere istoric, gândirea e mult mai veche decât limbajul uman, care nu există decât de câteva zeci de mii de ani — e însă greu de crezut că, înainte de limbaj, oamenii n-au gândit (la fel cum animalele sau copiii mici, aceia care încă nu vorbesc, trebuie să aibă o formă oarecare de gândire).

Din păcate, e foarte greu de înțeles ce tip de logică urmează gândirea nonverbală, asta și pentru că logica se referă la limbaj și e aproape imposibil să studiezi o gândire nonverbală cu instrumentele limbajului. Cu toate acestea, gândirea inconștientă e crucială pentru formularea unor idei noi: nu doar că e folosită în timpul lungii perioade de incubație despre care vorbeau Poincaré și Hadamard, dar

stă și la baza fenomenului mai general al intuiției matematice. Într-adevăr, la prima vedere, intuiția matematică prezintă caracteristici surprinzătoare.

În mod obișnuit, o demonstrație e compusă dintr-o serie de pași succesivi în urma cărora, din deducție în deducție, se ajunge la soluție. Cu excepția unor cazuri rare însă nu acesta e modul în care a fost demonstrată teorema. În mod normal, la început se formulează enunțul: acum, știind de unde se pleacă și unde trebuie ajuns, se formulează pașii intermediari care apoi sunt conectați între ei prin demonstrațiile necesare, până când se ajunge la demonstrația completă. E ca la construcția unui pod: întâi se stabilește de unde până unde trebuie mers, apoi se pun fundațiile pilonilor intermediari și abia la sfârșit se face calea de rulare. N-are sens să construiești un pod pornind cu prima arcadă și să o proiectezi pe a

doua numai după ce ai terminat-o pe prima: riști să descoperi abia acum că nu poți pune fundația celui de-al doilea pilon.

Într-un anume fel, o demonstrație trebuie să fie prezentă în mintea matematicianului, cel puțin în linii generale, înainte de a trece la faza deductivă — la fel cum o frază trebuie să fie prezentă în integralitatea sa dinainte să fi fost formalizată în cuvinte.

Acest fel de a proceda explică de ce există atâtea teoreme valide a căror primă demonstrație a fost greșită. Adesea, matematicianul, după ce a formulat corect teorema și a identificat o cale posibilă, greșește demonstrația unui pas intermediar. Dacă intuiția era foarte aproape de adevăr, atunci ori există vreo altă modalitate corectă pentru a demonstra acel pas dificil, ori se găsește o altă cale, mai mult sau mai puțin diferită, pentru a ajunge la același rezultat. Matematicienii

vorbesc de multe ori despre „semnificația“ unei teoreme, semnificație care se enunță într-un limbaj informal, bazat mai ales pe analogii, asemănări, metafore, intuiții. De obicei însă această semnificație nu mai apare în textele matematice, acestea folosesc un limbaj diferit: semnificația justifică într-un fel intuiția originară, dar, nefiind formalizabilă, e considerată ceva imprecis despre care se poate discuta între prieteni, dar care nu poate fi inserat într-un text riguros.

Intuiția

Există și intuiție fizică, diferită de aceea matematică, și ea a evoluat în timp. După cum observă istoricul științei Paolo Rossi, Galileo a avut marea intuiție că lumea cerească și lumea pământeană sunt asemănătoare și că se pot folosi aceleași legi pentru amândouă. Afirmația aceasta e punctul de plecare pentru multe descoperiri ale

lui Galileo, dar nu era deloc ușor de demonstrat, pentru că adesea se intra în cerc vicios, cum bine observa deloc reverențiosul filosof al științei Paul Feyerabend: petele solare demonstrau că lumea cerească era coruptibilă numai dacă ele nu erau un artefact al lunetei. Cum nu era posibilă verificarea faptului că luneta nu crea o imagine falsă a lumii cerești, observațiile lui Galileo implicau ori că petele solare există și deci lumea cerească e coruptibilă, ori că luneta produce imagini false și interacționează în mod diferit cu lumina provenită de la obiecte cerești sau de la obiecte terestre. Evident că a doua ipoteză era foarte dificil de susținut, deoarece petele solare se roteau cu viteză constantă (efect al rotației Soarelui). Totuși, în vremea aceea ipoteza unor legi unice pentru întregul Univers era tulburătoare și mulți nu acceptau intuiția galileiană, respingându-i

consecințele până când nu a fost demonstrată.

Intuiția fizică a avut un rol fundamental și după aceea a fost extrem de importantă în vremea în care se năștea mecanica cuantică, la începutul secolului XX. Aceasta a fost una dintre cele mai mari aventuri ale fizicii, iar între anii 1901 și 1930, a implicat savanți eminenți precum Planck, Einstein, Bohr, Heisenberg, Dirac, Pauli, Fermi... Aparent, a fost un proces foarte ciudat, chiar contradictoriu în unele privințe. Se observaseră o serie de fenomene (radiația corpului negru, de exemplu) pe care fizicienii din epocă nu reușeau să le explice: nu era vorba despre incapacitate, pentru că puteau fi explicate doar cu ajutorul mecanicii cuantice, care încă nu fusese descoperită.

Care ar fi fost procedura logică? Să inventeze mecanica cuantică și să prezinte demonstrația corectă! Istoria a urmat o cale complet diferită; s-a

încercat în mai multe rânduri explicarea fenomenelor cuantice în interiorul unor modele clasice explicite plecând de la ipoteza că unele componente mai puțin cunoscute ale modelului se comportă bizar (de fapt, incompatibil cu mecanica clasică), după tipicul „sunt chestiuni pe care încă nu le-am înțeles, dar o să le înțeleg în articolul succesiv". După articolul lui Planck din 1900, au apărut multe contribuții contradictorii, unele dintre ele evident greșite; pe de altă parte, nici nu puteau fi corecte, pentru că articolele acelea încercau să facă ceva imposibil, anume să justifice fenomene cuantice în interiorul mecanicii clasice. Planck, de exemplu, pentru a explica radiația corpului negru, presupunea că lumina interacționează cu oscilatori care aveau proprietățile cuantice corecte, absolut incompatibile cu principiile generale ale fizicii clasice. Dar Planck nu-și dădea seama că acea

presupusă compatibilitate cu fizica clasică nu exista și mergea înainte pe drumul său.

E impresionant de observat că explicațiile parțiale prezentate erau corecte: intuiția fizică era atât de puternică, încât, crezând că se păstrează în haina mecanicii clasice, se explicau fenomene cuantice, ducând astfel din ce în ce mai departe contradicția dintre mecanica clasică și fenomenele observate. La urmă, atunci când se acumulaseră prea multe contradicții, multe aspecte ale noii mecanici cuantice fuseseră deja prefigurate. Ca să dăm un exemplu, în teoria lui Bohr din 1913, presupunând că unicul electron care se rotește în jurul atomului de hidrogen poate sta singur numai pe anumite orbite care satisfac o anume condiție, se puteau calcula ușor liniile spectrale ale luminii emise de hidrogen; ipoteza nu putea fi susținută în mecanica clasică, dar a fost fundamentală

pentru furnizarea indiciilor necesare construcției mecanicii cuantice când, zece ani mai târziu, a fost conștientizată urgența nevoii de o nouă mecanică.

Ultimele bariere au căzut între 1924 și 1925; în anii următori, progresele au fost impresionante, iar la sfârșitul lui 1927, noua mecanică cuantică își căpătase practic formularea definitivă. Munca pregătitoare (timp de douăzeci și cinci de ani, din 1900 până în 1925) a fost posibilă tocmai pentru că a existat o intuiție puternică asupra felului în care e organizat sistemul fizic. Era o intuiție foarte diferită de aceea a matematicienilor și a dus la lucrări care au făcut fizica să progreseze în pofida argumentelor adesea greșite.

Tot în legătură cu intuiția, un prieten de-ai mei, fizician experimentalist al temperaturilor joase, îmi spunea: „Trebuie să ajungi să-ți cunoști atât de bine aparatul cu

care experimentezi, sistemul pe care-l măsori, fenomenele pe care le studiezi, încât să fii în stare să dai răspunsul corect fără măcar să te gândești. Dacă ți se pune (sau îți pui) o întrebare, trebuie să poți da imediat răspunsul exact și abia apoi, reflectând, să explici de ce era corect acel răspuns". În prefața la frumoasa lui carte de mecanică, Giovanni Gallavotti spune că un student bun trebuie să reflecteze la demonstrația unei teoreme până când teorema îi apare ca evidentă și, în consecință, demonstrația devine inutilă.

Intuiția depinde mult de domeniu; de exemplu, sunt cazuri în care intuiția se bazează pe formalismul matematic. Formalismul e un instrument extrem de puternic, dar devine și mai puternic când însuși inconștientul se obișnuiește să folosească procedee algoritmice. Așa cum am văzut, când făceam primele cercetări asupra sticlelor de spin, am folosit metoda replicării, un

formalism pseudomatematic (în sensul că validitatea matematică a ceea ce făceam avea să fie demonstrată doar după mai mulți ani) care-mi îngăduia să ajung la rezultatul final fără să înțeleg ce anume făceam, fiind apoi nevoie de ani de zile până să se înțeleagă semnificația fizică a rezultatelor mele. Îmi construisem inconștient o serie de reguli pe care le foloseam pentru a înțelege direcția de urmat cu calculele, reguli pe care în ruptul capului n-aș fi știut să le formalizez.

Înaintarea în manieră inconștientă nu e un procedeu tipic numai pentru problemele științifice. O mare scriitoare din secolul XX, Luce D'Eramo, spunea că, atunci când scria un roman, proceda, de regulă, în felul următor: recitea tot ce scrisese până la acel moment și decidea cum avea să înceapă scena următoare. În acel punct lua mental personajele, le punea în acțiune în scena care urma și le observa: „Nu

decid eu ce-au de făcut, ci mi le imaginez și le observ în timp ce vorbesc și acționează: eu transcriu ce fac ele". Asemănările sunt evidente cu procedeul descris de Poincaré și Hadamard.

A cunoaște concluzia

Aș vrea să prezint acum un ultim argument care sugerează în ce fel modul nostru de a raționa e mai complex decât ne închipuim. M-a frapat întotdeauna dificultatea de a ajunge să demonstrezi adevărul ori falsitatea unei afirmații atunci când nu ai nici măcar un indiciu asupra rezultatului final. Dacă există argumente euristice puternice care implică faptul că o afirmație e adevărată (sau falsă), adesea (dar nu întotdeauna), e mult mai *ușor* de găsit demonstrația. În caz contrar, când lipsesc indicațiile despre rezultat, ne-am putea aștepta să reușim să ajungem la rezultatul final cel mult într-un timp de două ori

mai lung: jumătate din timp raționăm ca și cum am ști că rezultatul e adevărat, altă jumătate crezând că rezultatul e fals. Ușor de zis, greu de făcut; în practică, cineva încearcă să găsească argumente pentru demonstrarea adevărului afirmației și, dacă nu găsește, încearcă să-i demonstreze falsitatea, oscilând între cele două direcții fără să progreseze prea mult. Poate că în mod conștient putem trece de la o ipoteză la alta, dar inconștientul rămâne descumpănit.

Rolul relevant al unei mici informații suplimentare poate fi evidențiat printr-un episod la care am asistat și care m-a lăsat mască. În cadrul unor modele extrem de simplificate, s-a văzut că apare o proprietate foarte interesantă (o să-i spun X, să fie mai simplu), iar pentru avansul teoriei era crucial să înțelegem dacă proprietatea avea loc și în cazul sistemelor reale. Discutam de ani de zile cu prietenii mei despre

asta: niciunul nu avea habar cum s-ar putea ataca demonstrația, ba chiar ne îndoiam că proprietatea ar fi demonstrabilă, admițând că ar fi fost adevărată.

Într-o bună zi, prietenul meu Silvio Franz mi-a povestit că, împreună cu Luca Peliti, demonstrase proprietatea X exploatând o idee foarte simplă, dar extrem de ingenioasă. M-am bucurat; m-am dus la Paris, unde, în timpul unei conferințe, am declarat că sunt foarte încrezător că proprietatea X poate fi observată. Nu am anunțat rezultatul, pentru că voiam să aștept până când scrie prietenul meu demonstrația. După conferință, pe scările de la École Normale, un alt prieten, Marc Mézard, mi-a spus: „Giorgio, nu te supăra, dar de ce ai spus că ești încrezător că proprietatea X e demonstrabilă? Știi foarte bine că nu există niciun mod în care să poată fi demonstrată". I-am zis: „Marc, proprietatea X tocmai a fost

demonstrată de Silvio Franz și Luca Peliti: mi-au spus cum și e corect". Spre stupoarea mea, Marc mi-a răspuns pe dată: „Ah, da, înțeleg" și mi-a expus de-a fir a păr demonstrația corectă. Simpla informație că proprietatea X e demonstrabilă plecând de la bagajul de cunoștințe comune i-a fost suficientă ca să ajungă la demonstrația atât de mult căutată în mai puțin de zece secunde.

E impresionant cum, uneori, e de ajuns o minimă informație ca să înregistrezi progrese substanțiale într-un domeniu la care s-a lucrat mult. Einstein, de exemplu, povestește că, în 1907, se gândea mult la gravitație și într-o zi a avut „intuiția cea mai fericită din viața lui": când ne prăbușim în cădere liberă, nu mai simțim forța de gravitație, gravitația se anulează în jurul nostru; forța de gravitație depinde de sistemul de referință și, alegând un sistem de referință

adecvat, o putem anula, cel puțin într-un spațiu determinat. Pornind de la această observație, a construit teoria relativității generale, care e probabil contribuția sa cea mai profundă și cea mai avansată pentru timpul respectiv.

Se povestește că Einstein a avut intuiția aceasta în urma unui episod ciudat (n-aș băga mâna-n foc că e adevărat, dar, și dacă nu e, tot se potrivește grozav). Un zugrav lucra la blocul în care locuia Einstein și ajunsese la etajul al treilea, așezat pe un scaun pus pe schelă; într-o zi, s-a aplecat prea mult, și-a pierdut echilibrul și a căzut, rămânând așezat pe scaun, rupându-și, din fericire, doar câteva oase. Câteva zile mai târziu, discutând cu un vecin, Einstein s-a întrebat: „Cine știe la ce se gândea bietul zugrav în timp ce cădea“, iar vecinul i-ar fi răspuns: „Am vorbit cu el și mi-a spus că, în timp ce cădea, nu simțea că stă pe scaun, ca și cum n-ar mai fi existat

forța de gravitație“. Moment în care Einstein ar fi prins din zbor observația zugravului și acesta ar fi fost punctul de plecare pentru formularea relativității generale. E remarcabil că originea teoriei gravitației e întotdeauna legată de ceva care cade: un măr, la Newton, un zugrav, la Einstein.

Sensul științei

Accentul pus pe efectele imediate ale științei e o nebunie. Este celebrul răspuns dat de Michael Faraday ministrului britanic care-l întreba la ce serveau aparatele lui electromagnetice: „N-aș ști să vă spun acum; dar e foarte probabil ca în viitor să aplicați o taxă pe ele“.

„Știința e ca sexul, are și consecințe practice, dar nu de asta o practicăm“, spunea Richard Feynman, unul dintre cei mai mari fizicieni ai secolului XX și poate cel mai simpatic.

Fraza aceasta, alături de imperativul dantesc „Voi fii sunteți ai nobilei ființe și nu născuți spre trai de dobitoc,/ci-onoare să cătați și cunoștințe!“[2], reflectă foarte bine pasiunile subiective ale oamenilor de

știință. Știința e un puzzle enorm și orice piesă care e pusă la locul potrivit deschide posibilitatea de a plasa cum se cuvine și alte piese. În acest mozaic gigantic, orice om de știință așază câteva piese, conștient fiind că aduce astfel o contribuție și că, atunci când numele său va fi uitat, cei de după el se vor fi cățărat și pe umerii lui ca să privească mai departe.

Iată o metaforă foarte sugestivă a întreprinderii științifice. Câțiva navigatori debarcă în timpul nopții pe o insulă necunoscută și aprind un foc pe plajă; încep să vadă ce-i în jurul lor. Cu cât întețesc focul, cu atât se extinde zona pe care o văd bine; dar dincolo de aceasta, tot mai rămâne o regiune misterioasă care abia se distinge în întunericul aproape compact, întrerupt pe alocuri de lumina pâlpâitoare a focului îndepărtat, regiune care se mărește pe măsură ce se întețește focul. Cu cât explorăm mai mult

universul, cu atât descoperim noi regiuni de explorat: fiecare descoperire ne permite să enunțăm o mulțime de noi întrebări pe care, mai înainte, nici măcar nu eram în stare să le formulăm.

Dar, dincolo de aceste considerații, pentru oamenii de știință este fundamental ca în încercarea de a rezolva *Infernul* ghicitoarea să fie distractivă. Când se discuta despre ce avem de făcut, profesorul meu Nicola Cabibbo spunea: „De ce-am studia problema asta, dacă nu ne amuză?“ Adeseori, oamenii de știință sunt aproape uimiți că ajung să fie plătiți tocmai pentru a face ceva care îi pasionează. Un bun prieten, Aurelio Grillo, obișnuia să spună: „Să te ocupi cu fizica e o corvoadă, dar tot e mai bine decât să muncești“.

În ciuda acestui fapt, cu excepția acelor cazuri rare în care omul de știință provenea dintr-o familie înlesnită și cercetarea se desfășura în lungi perioade de tihnă (să ne

gîndim doar la Pliniu cel Bătrân sau la Fermat), oamenii de știință au avut întotdeauna probleme cu procurarea banilor necesari traiului, iar aplicațiile științei au fost fundamentale pentru scopul acesta. Iată, de exemplu, astronomia, una dintre primele științe în ordine temporală. Azi, când trăim în orașe bine iluminate, e greu să ne imaginăm în mod concret cât de importantă era în civilizațiile primitive prestigiul și puterea celor care controlau curgerea anotimpurilor, mișcarea astrelor și care puteau prezice eclipsele de Lună (ca să nu pomenim și de acel fenomen înspăimântător pe care îl reprezentau eclipsele de Soare).

Chiar dacă motivațiile unor mecena puteau fi doar culturale sau de prestigiu social, e sigur că oamenii de știință nu pierdeau din vedere importanța aplicațiilor practice: Galileo, de exemplu, propusese să se folosească eclipsa sateliților lui

Jupiter ca metodă pentru determinarea orei absolute, fără a mai avea nevoie de orologii precise, putându-se stabili astfel longitudinea. În realitate, propunerea lui Galilei era prea complicată pentru a fi pusă în practică, iar problema a fost definitiv rezolvată în secolul următor, odată cu apariția cronometrului de precizie, încununare a peste o sută de ani de cercetări.

Scopul principal pentru care au fost create, în secolul al XVI-lea și al XVII-lea, multe dintre Academiile care domină încă scena a fost tocmai acela de a coordona cercetarea științifică: Accademia dei Lincei în 1603, Royal Society în 1660, Académie des Sciences în 1666, American Philosophical Society în 1743. Aceasta din urmă e deosebit de interesantă: a fost întemeiată de Benjamin Franklin cu scopul declarat de a promova *cunoașterea utilă*.

Odată cu trecerea anilor, știința devine din ce în ce mai utilă societății (dezvoltarea economică se bazează pe progres științific), dar și din ce în ce mai costisitoare, reclamând instalații și o organizare mereu mai complexă. Al Doilea Război Mondial marchează primele semne de viață ale științei de masă („știința mare“): Vannevar Bush coordonează eforturile de război a șase mii de oameni de știință americani și, în același timp, cincizeci de mii de persoane lucrează la construcția primelor bombe atomice. Azi, sectorul cercetare-dezvoltare absoarbe un pic peste 1% din PIB-ul Italiei, dar ajunge la peste 4% în Coreea de Sud (nu doar că ne-au eliminat de la Mondialul din 2002, dar mai și cheltuie de trei ori mai mult decât Italia pentru cercetare și dezvoltare).

Știința cu instituțiile sale trebuie finanțată de societate, iar acesteia puțin îi pasă dacă oamenii de știință

se distrează sau nu. E un punct de vedere exprimat foarte limpede de delegația sovietică la Congresul de istorie a științei și a tehnologiei ținut la Londra, în 1931. Nikolai Buharin (o personalitate politică de prim-rang, foarte popular în URSS, mai târziu, una dintre victimele ilustre ale epurărilor staliniste) scria că „ideea că știința e un scop în sine e naivă: ea confundă *pasiunile subiective* ale omului de știință profesionist, care lucrează într-un sistem de diviziune a muncii destul de strict [...], cu *rolul social* obiectiv al acestui gen de activitate, una de mare importanță *practică*“.

Dezvoltarea tehnologică e de negândit în lipsa progresului paralel al științei pure. Așa cum bine s-a spus într-o carte din 1977, *L'ape el'architetto*[10], știința pură nu doar furnizează științei aplicate cunoștințele necesare pentru a se putea dezvolta (limbaje, metafore, cadre conceptuale), ci mai are un rol,

unul nu atât de vădit, însă nu mai puțin important. Într-adevăr, activitățile științifice de bază funcționează ca un enorm circuit de omologare a produselor tehnologice și de stimulare a consumului de bunuri de înaltă tehnologie avansată.

Această integrare profundă între știință și tehnică ar putea sugera că știința are un viitor luminos într-o societate din ce în ce mai dependentă de tehnologia avansată (atât de răspânditele telefoane celulare de azi ajung la o capacitate de calcul de sute de miliarde de operații aritmetice pe secundă, cam cât supercomputerele-mastodont de acum douăzeci și cinci de ani).

În realitate, situația pare să fie exact pe dos: există tendințe antiștiințifice foarte puternice în societatea de azi, prestigiul științei și încrederea în aceasta se diminuează rapid, practicile astrologice, homeopate și antiștiințifice (vezi, de

exemplu, mișcarea NoVax sau negaționismul Xylellei ca origine a bolii măslinilor din Puglia, ca să nu mai vorbim despre cel al COVID-19) se răspândesc în paralel cu un vorace consumerism tehnologic.

Nu e ușor de înțeles până la capăt originea acestui fenomen; e posibil ca neîncrederea de masă în știință să fie și urmarea unei evidente aroganțe a oamenilor de știință care o prezintă ca pe înțelepciunea absolută, față de alte posibile forme de cunoaștere, chiar atunci când, de fapt, nu e deloc așa. Uneori, aroganța constă în a nu încerca să transmiți publicului dovezile disponibile, cerând în schimb un consimțământ necondiționat bazat pe încrederea în experți. Tocmai refuzul acceptării propriilor limite poate slăbi prestigiul oamenilor de știință, care se drapează adesea într-o excesivă siguranță inautentică, în fața unei opinii publice care, într-un fel sau altul, îi simte limitele și viziunea

parțială. Uneori, popularizatori proști prezintă rezultatele științei ca pe o vrăjitorie superioară ale cărei motivații le înțeleg doar inițiații. Astfel, cine nu e om de știință poate fi împins către poziții iraționale în fața unei științe percepute drept magie inaccesibilă și, deci, să prefere alte speranțe iraționale (temă reluată în mare detaliu de Marco d'Eramo în *Lo sciamano in elicottero*[11], 1999): dacă știința devine o pseudomagie, de ce să nu alegi magia adevărată?

A avea încredere oarbă în ineluctabilitatea nevoii pe care o are dezvoltarea tehnologică de dezvoltarea științei poate fi o eroare tragică. Romanii au păstrat tehnologia greacă fără a se îngriji prea mult de știință, iar creștinii fanatici, comandați de sfântul episcop și părinte al Bisericii Chiril din Alexandria, au hăcuit-o liniștiți pe matematiciana și astronoama Hipathia, fără să le pese de consecințele pe termen lung,

bucurându-se, dimpotrivă, de dispariția unei cunoașteri profane pe care o găseau inutilă, chiar dăunătoare.

Dar chiar dacă, la nivel planetar, știința va continua să se dezvolte trăgând după ea tehnologia, nu există nicio garanție că la fel se va întâmpla într-o țară ca Italia. Dezindustrializarea sistematică e firul conducător al istoriei noastre începând cu moartea misterioasă a lui Enrico Mattei (1962), alături de dezinteresul din ce în ce mai accentuat al marii industrii pentru cercetare după sfârșitul experiențelor-pilot ca aceea a lui Olivetti. E foarte posibil ca guvernanții noștri să decidă că industria și cercetarea italiene trebuie să aibă o poziție tot mai secundară și că țara trebuie să alunece treptat înspre lumea a treia.

Dacă luăm în calcul și lenta decădere a școlii publice, absența preocupării guvernului italian pentru

investiții în bunurile culturale (e suficient să amintesc că restaurarea Colosseumului s-a făcut cu fonduri private și că Fondul unic pentru spectacol se micșorează în fiecare an, ajungând la jumătatea cifrelor de acum douăzeci de ani), atunci ne dăm seama că *toate* activitățile culturale italiene se află într-un lent, dar constant declin.

Cultura italiană trebuie apărată pe toate fronturile, nu trebuie să ne pierdem capacitatea de a o transmite noilor generații. Dacă italienii își pierd cultura, ce mai rămâne din țară? E nevoie de un front comun al tuturor operatorilor culturali italieni (de la educatoarele din grădinițe la academii, de la programatori la poeți) pentru a înfrunta și a rezolva urgența culturală actuală.

Știința nu trebuie apărată doar pentru aspectele sale practice, ci și pentru valoarea sa culturală. E necesar să avem curajul să luăm exemplu de la Robert Wilson, care,

în 1969, confruntat cu un senator american ce întreba insistent care sunt aplicațiile construcției acceleratorului de la Fermilab, de lângă Chicago, în particular, dacă era util din punct de vedere militar, pentru apărarea țării, a răspuns: „Valoarea lui constă în dragostea pentru cultură: e ca și pictura, sculptura, poezia, ca toate acele activități de care americanii sunt în mod patriotic mândri; nu servește apărării țării, dar face în așa fel încât să merite să ne apărăm țara".

Pentru ca știința să se afirme drept cultură, populația trebuie să fie conștientă de ceea ce este știința, de felul în care știința și cultura se întrepătrund, fie în dezvoltarea lor istorică, fie în paractica de zi cu zi. Trebuie explicat, dar nu în manieră magică ce fac oamenii de știință contemporani, care sunt provocările de azi. Nu e ușor, mai ales pentru științele tari în care matematica are un rol esențial; totuși, cu un anumit

efort, se pot obține rezultate foarte bune.

Se spune adesea că științele tari nu pot fi înțelese de cine nu a studiat matematica. Dar e aceeași problemă cu poezia chineză, care e un amestec inseparabil de literatură și pictură: manuscrisul original al poeziei e un tablou în care ideogramele sunt elemente picturale reprezentate diferit de fiecare dată. Dimensiunea picturală se pierde complet prin traducere, iar frumusețea poemului nu poate fi apreciată de cine nu cunoaște bine limba chineză. Dar așa cum e posibil să apreciezi totuși poezia chineză tradusă în italiană, la fel e posibil să faci înțeleasă frumusețea științei și celor care nu cunosc matematica și nu au urmat studii științifice.

Nu e ușor, dar se poate. Trebuie promovate inițiativele ce permit cât mai multor persoane să se apropie de știința modernă. Dacă nu se face

asta, responsabilitatea cade și pe umerii oamenilor de știință.

---

9 Cântul 26 (118), Dante Alighieri, *Divina Comedie*, traducerea de George Coșbuc, Editura Galimmar, București: 2015. (*N.t.*)

10 L'ape el'architetto: paradigmi scientifici e materialismo storico (*Albina și arhitectul: paradigme științifice și materialism istoric*), de G. Ciccotti, M. Cini, M. de Maria, G. Jona-Lasinio, Editura Feltrinelli, Milano: 1976 (*N.t.*)

11 *Șamanul în elicopter* (*N.t.*)

Je ne regrette rien

La masă, la CERN, Tini Veltman mă sfătuise: „Nu te apuca de prea multe lucruri, concentrează-te pe câteva doar, însă importante".

N-am știut niciodată dacă a fi ratat la mustață un premiu Nobel la vârsta de douăzeci și cinci de ani e ceva de povestit cu mândrie sau, mai curând, unul dintre acele secrete un pic rușinoase pe care ai face mai bine să le uiți. Eu înclin înspre a doua variantă, dar, cum întâmplarea are farmecul ei, o s-o povestesc totuși. Trebuie făcut însă un mic efort pentru a înțelege contextul, altminteri vă va părea insipidă.

Să ne închipuim că suntem la sfârșitul anilor șaizeci. Cadrul experimental e limpede: protonul, neutronul și celelalte particule

cunoscute pe-atunci interacționează puternic între ele. Altfel spus, dacă le ciocnim, traiectoria lor se modifică, iar la energii foarte înalte, ciocnirile produc multe alte particule. E cunoscut faptul că sunt foarte rare ciocnirile în care doi protoni ricoșează elastic unul dintr-altul, ca două bile de biliard, când energia ciocnirii e foarte mare.

Raritatea acestor ciocniri se explica într-o teorie în care protonul și neutronul sunt particule compozite: în timpul ciocnirii, aceștia se desfac literalmente în bucăți, deci nu pot ricoșa rămânând întregi. Mai trebuia însă de înțeles cum se comportă constituenții fundamentali, particulele din care erau formați protonii și neutronii. Existau două posibilități:

- Ciocnirile în care aceste particule ricoșau erau frecvente, chiar și la energii mari. Particulele interacționau deci puternic între

ele la toate energiile. În acest caz, comportamentul materiei rămânea în continuare greu de înțeles și nu existau simplificări la energii înalte.

- Ciocnirile în care particulele fundamentale ricoșau erau *puțin* frecvente, adică particulele interacționau între ele slab la energii mari și deveneau aproape transparente una față de cealaltă. Comportamentul la energii înalte al constituenților protonilor și neutronilor era ușor de calculat: în practică, traiectoriile lor nu se modificau, ca și cum n-ar fi existat interacțiune. O teorie de acest tip e numită azi *asimptotic liberă* (în jargonul fizicienilor, o teorie e *liberă* când particulele nu deviază de la traiectoriile lor, și *asimptotic* înseamnă „la energii mari“).

O teorie asimptotic liberă avea avantajul că la energii mari unele cantități erau calculabile relativ simplu: exista deci un număr enorm de fenomene potențial predictibile, spre bucuria fizicienilor teoreticieni. Cu toate acestea, dat fiind că, cel mai probabil, universul nu fusese proiectat ca să ușureze viața fizicienilor teoreticieni, argumentul acesta nu implica faptul că universul ar putea fi descris în mod necesar de o teorie asimptotic liberă.

Eu începusem să lucrez adoptând prima ipoteză: îmi plăcea mai mult, pentru că situația era mai greu de înțeles și obținerea de rezultate era o provocare mai mare. Era — ca în fabulele lui Esop — și un fel de a nu vrea să iei strugurii: „Sunt prea acri“. Într-adevăr, nimeni nu reușise să formuleze o teorie în care posibilii constituenți să interacționeze din ce în ce mai puțin pe măsură ce crește energia: cred că aceia, puțini, care reflectaseră la problemă ajunseseră la

concluzia că o asemenea teorie nu există. În 1955, genialul fizician rus Lev Landau observase că în toate teoriile cunoscute forța de interacțiune creștea odată cu creșterea energiei, poate doar cu excepția interacțiunilor asemănătoare celor electromagnetice, dar în care câmpul însuși avea sarcină (cele numite teorii Yang-Mills), pentru care calculele erau dificile, așa că nu se putea ști încă dacă era adevărat sau nu. Din punct de vedere tehnic, Landau descoperise existența unei funcții (numită de obicei *beta*) care controla comportarea la energii mari: când funcția beta era pozitivă, interacțiunea rămânea puternică; când era negativă, teoria era asimptotic liberă.

În 1968, Richard Feynman sugerase că particulele cunoscute ar fi compuse din constituenți punctiformi cu interacțiuni neglijabile la energii înalte pe care le

numise partoni, întrucât erau părți de materie; în ciuda succesului acestei propuneri, eforturile pentru construcția unei teorii asimptotic libere stagnau.

Abia în 1972, Sidney Coleman a publicat un articol în care arăta că toate concluziile lui Landau erau perfect justificate, chiar considerând modele mai complicate decât cele studiate de fizicianul rus. Pentru înțelegerea semnului funcției beta rămâneau de studiat teoriile Yang-Mills: un semn negativ ar fi fost o surpriză neașteptată cu consecințe profunde pentru fizică. Printr-o ironie a sorții, am descoperit abia mulți ani mai târziu că acel calcul fusese făcut deja în 1969 de un fizician rus (Iosif Bencionovič Chriplovič) și publicat într-o revistă rusească tradusă în engleză pe care o aveam la bibliotecă. Sărmanul fizician o luase înaintea vremii sale. În ciuda eleganței și clarității

calculului, nimeni nu a dat atenție rezultatului la vremea respectivă: eu l-am descoperit întâmplător, în timp ce căutam o altă lucrare din aceeași revistă.

Îmi era limpede importanța calculării semnului funcției beta în teoriile Yang-Mills. Dar eram acaparat de o problemă diferită (tranzițiile de fază) și nu am alocat mult timp acelui calcul. Îmi amintesc că, după ce am citit articolul lui Coleman din 1972, am început să mă gândesc la semnul funcției beta din aceste teorii. Într-o zi, în timp ce făceam baie în cada din casa părinților, m-am concentrat asupra problemei privind fix pereții acoperiți cu marmură portocalie. Am stabilit rapid că funcția beta ar trebui să fie suma a trei părți distincte: două de semne opuse și care se reduceau, a treia era iremediabil pozitivă, așa că totalul trebuia să fie pozitiv. Dacă însă aș mai fi stăruit un pic și aș fi scris calculul folosind regulile pentru

teoriile Yang-Mills pe care le știam teoretic — chiar dacă nu le folosisem niciodată —, mi-aș fi dat imediat seama că trebuia să mai adaug și o a patra parte, negativă, ce domina rezultatul, care, astfel, ieșea negativ. Dar rezultatul pozitiv îmi plăcea, n-am controlat calculul și am rămas cu o convingere greșită. Însă nu acesta e episodul pe care voiam să-l povestesc: aceasta e o eroare tipică pricinuită de grabă și nu deosebit de semnificativă, utilă totuși pentru a contextualiza faptele.

Apoi situația a început să se schimbe cu repeziciune. La conferința de la Marsilia, din vara lui 1972, fizicianul din Utrecht, Gerard 't Hooft (26 de ani), a anunțat că a calculat semnul funcției beta în teoriile Yang-Mills... și rezultatul era negativ! Marele anunț a căzut în mijlocul unei totale indiferențe; prezenți erau foarte puțini și nici aceia foarte atenți: un an mai târziu, un prieten, expert în

domeniu, întrebat despre chestiune, își amintea doar că, într-adevăr, 't Hooft spusese ceva, dar nu-și aducea aminte ce anume.

Singurul care a înțeles cum se cuvine importanța rezultatului lui 't Hooft a fost Kurt Symanzik, un fizician german genial, în jur de cincizeci de ani, care l-a îndemnat pe 't Hooft să scrie un articol despre rezultatul său. Împreună cu conducătorul tezei lui, Tini Veltman, 't Hooft tocmai rezolvase o problemă fundamentală pentru teoria interacțiunilor slabe (pentru care au luat împreună Nobelul în 1999) și începuse să facă niște calcule extrem de dificile privind relativitatea cuantică: calculul funcției beta era doar un pic mai mult decât un exercițiu pentru el și n-avea timp să-l redacteze.

Eu eram bun prieten cu Symanzik. În noiembrie a aceluiași an, l-am vizitat pentru două săptămâni la Hamburg: m-a dus în restaurantul

din vârful turnului de televiziune, unde puteai mânca o mulțime de feluri de tort (aveau șase sortimente și eu am luat câte o felie din fiecare), am fost să vedem o foarte frumoasă versiune a *Flautului fermecat,* m-a invitat la cină acasă la el, ca să mâncăm pesmeți cu macrou în ulei, alături de lapte pasteurizat amestecat cu lapte condensat, am discutat zeci de ore despre fizică disecând temele de interes comun, dar, în mod surprinzător, nu mi-a vorbit despre rezultatul lui 't Hooft. După cum mi-a explicat Veltman un an mai târziu, Symanzik îi spusese: „Parisi e un nebun", atât de impetuos, că e mai bine să nu-i spui nimic. Symanzik se temea să nu scriu vreun articol folosind rezultatul lui 't Hooft, recunoscându-i, evident, contribuția. N-ar fi fost nimic incorect din partea mea, dar Symanzik prefera ca rezultatul să fie făcut cunoscut lumii direct de 't Hooft, și nu prin intermediul unui terț.

Abia în februarie 1973 Symanzik mi-a spus despre rezultatul lui 't Hooft. Pe-atunci abia făcusem un pas înainte important în tranzițiile de fază și rezultatul acela nu mi-a captat atenția. Dar tocmai mă transferasem la CERN, la Geneva, pentru două luni, și, cum și 't Hooft lucra acolo, ne-am hotărât să ne vedem într-o dimineață ca să ne gândim cum am putea folosi rezultatul lui pentru a construi o teorie a protonului și a celorlalte particule, care să fie asimptotic liberă.

De fapt, trebuiau identificați posibilii constituenți care stăteau la baza teoriei și era necesar să se verifice că, în acel caz specific, calculul lui 't Hooft producea o funcție beta negativă. Părea ușor, în 1964 apăruse ipoteza quarcilor, iar în 1971 Gell-Mann, Bardeen și Fritzsch propuseseră teoria conform căreia fiecare quarc exista în trei culori diferite care interacționau schimbând gluoni colorați: în

principal, era teoria Yang-Mills studiată de ’t Hooft în măsura în care era vorba despre gluoni cu adăugarea quarcilor. Eu cunoșteam perfect teoria lui Gell-Mann: venise la Roma și o expusese într-o conferință publică în care arătase că acea teorie explica datele obținute cu acceleratorul ADONE situat la Frascati, laboratorul în care lucram. Argumentul lui Gell-Mann se baza pe ipoteza că quarcii nu interacționează la energii înalte, deci că teoria era asimptotic liberă. Eu pariasem pe ipoteza contrară, că quarcii interacționau și la energii înalte și, prezumțios, am considerat naiv rezultatul lui Gell-Mann, pentru că nu ținea seama de toate complicațiile unei teorii în care quarcii interacționau. L-am dat uitării.

Cu mintea de-acum, conversația mea cu ’t Hooft a fost suprearealistă.

— Salut, Gerard, ce rezultat fain ai obținut! Hai să vedem dacă-l putem

folosi ca să construim o teorie ce descrie protonul și celelalte particule.

— Minunată idee, Giorgio! Dar cum facem? Câmpurile Yang-Mills trebuie să aibă și ele o sarcină! Ce sarcină alegem?

— Am putea lua sarcina electrică și alte sarcini de felul ăsta.

— Ei, nu. Asta ar duce la dificultăți insurmontabile cu datele experimentale.

— Hai să vedem dacă nu găsim vreun subterfugiu ca să facem să funcționeze propunerea mea.

— Nu, nu merge.

Și-mi explică în toate detaliile argumentul, iar eu nu găsesc nicio hibă.

— Da, ai dreptate, Gerard. Teoria ta nu se poate aplica la descrierea protonului și a celorlalte particule. Mare păcat! Pe curând.

Nicio clipă nu ne-a trecut prin minte să luăm în calcul sarcina de culoare, așa cum propusese Gell-Mann. Ar fi fost de-ajuns să văd

atunci numele lui Gell-Mann scris pe undeva (pe tablă, de exemplu) sau ca în zilele următoare, cineva, la masă, să zicem, să fi vorbit despre modelul Gell-Mann și aș fi alergat la 't Hooft urlând „Evrika!“: în două zile am fi rezolvat totul și am fi trimis articolul la revistă. A fost o orbire incredibilă a cărei întreagă responsabilitate îmi revine. Gerard era un fizician teoretician extrem de profund, capabil să analizeze aspecte deosebit de rafinate ale teoriei; eu, în schimb, cunoșteam de-a fir a păr lucrările experimentale, diferitele modele propuse în literatură: era treaba mea să identific modelul potrivit. În acea după-amiază a anului 1973 am lăsat să ne scape o ocazie de Nobel. Spre norocul fiecăruia dintre noi, avea să nu fie singura.

Câteva luni mai târziu, Hugh David Politzer, pe de o parte, David Gross și Frank Wilczek, pe de alta, au refăcut în același timp calculul lui 't Hooft și au identificat corect sarcinile

câmpurilor Yang-Mills. A fost actul de naștere al cromodinamicii cuantice, iar articolul le-a adus celor trei autori premiul Nobel în 2004. Eu am rămas cu o anecdotă de povestit.

După mulți ani, m-am întâlnit la un congres cu un prieten care urmărise îndeaproape toată tărășenia. Pe culoar, am început să discutăm despre Ken Wilson, care câștigase premiul Nobel pentru fizică în 1982 pentru teoria tranzițiilor de fază și ne-am adus aminte de argumentul lui că o teorie asimptotic liberă ar fi fost mai elegantă, dar cum Universul nu a fost creat de un croitor, eleganța teoriei nu e un criteriu înțelept. Eu am adăugat că pe-atunci eram cu totul de acord cu Wilson și exact din acest motiv nu m-am preocupat cine știe ce de găsirea unei teorii satisfăcătoare care să fie asimptotic liberă: și i-am povestit conversația mea cu 't Hooft. El a înțeles imediat care-a fost baiul:

— Dar, Giorgio, nu ți-a trecut prin minte să folosești culoarea, așa cum propusese Gell-Mann?

— Nu.

— Imposibil!

— Chiar nu mi-a trecut prin minte.

— Poate-ar fi fost mai înțelept să reflectezi mai mult de o jumătate de oră.

Notă

Lucram de mai mulți ani la volumul acesta, născut în jurul unor interviuri pe care mi le luase Anna Parisi. Interviurile au devenit germeni de capitole, iar aici am ales să adun și să dezvolt doar temele legate de motivațiile care mi-au adus premiul Nobel în octombrie 2021. Anna nu e rudă cu mine, dar m-am lăsat antrenat de ea în câteva proiecte de comunicare a științei; tot ea m-a ajutat la redactarea unor secțiuni din carte.

Trei dintre capitole reiau, cu unele modificări, texte publicate deja. *Schimb de metafore între fizică și biologie* și *Cum se nasc ideile* au fost inițial comunicări la două conferințe romane organizate de Accademia dei Lincei, respectiv *Metafore și simboluri în știință* (8–9 mai 2013) și *Istoria naturală a creativității* (3–4 iunie

2009), care au fost adunate apoi în două volume, din 2014 și 2010, ale editurii Scienze e Lettere. *Sensul științei* s-a născut din articolul cu titlul „La ce e bună știința" publicat în revista *Le Scienze* cu ocazia semicentenarului ei (septembrie 2018).

***

Mottourile capitolelor provin din interviuri acordate de-a lungul anilor lui Gabriele Beccaria și Francesco Vaccarino, Luisei Bonolis, lui Nuccio Ordine — le mulțumesc tuturor.

În continuare, câteva referințe bibliografice pentru articolele și sursele citate în capitolele cărții.

Un stol de grauri

Articolul în care am expus primele rezultate ale cercetărilor noastre e: M. Ballerini, N. Cabibbo, R. Candelier et al., *Interaction ruling animal collective behavior depends on topological rather than metric distance: Evidence from a field study*, „PNAS. Proceedings of the

National Academy of Sciences“, 105 (4), 2008, pp. 1232–1237.

Fraza citată din Max Planck apare într-o scrisoare a lui A. Sommerfeld către N. Bohr, din 4 octombrie 1913, în N. Bohr, *Collected Works*, vol II, îngrijit de U. Hoyer, Elsevier Science Ltd, Amsterdam: 1981.

Fizica la Roma, acum cincizeci de ani

Articolele în care Gell-Mann și Zweig propun, independent unul de celălalt, în ianuarie 1964, modelul cu quarci sunt: M. Gell-Mann, *A schematic model of baryons and mesons*, „Physics Letters“, 8 (3), 1964, pp. 214–215 și G. Zweig, *An SU(3) model for strong interaction symmetry and its breaking*, CERN Report numărul 8182/TH.401. Culoarea a fost introdusă în O.W. Greenberg, *Spin and unitary-spin independence in a paraquark model of baryons and mesons*, „Physical Review Letters“, 13 (20), 1964, pp. 598–602.

Metafora fazanului și vițelului apare în M. Gell-Mann, *The symmetry group of vector and axial vector currents*, „Physics“, 1(11), 1964, pp. 63–75.

Tranziții de fază sau fenomene colective

Articolele lui Kenneth Wilson despre grupul de renormalizare la care m-am referit sunt: K.G. Wilson, *Renormalization group and critical phenomena. I. Renormalization group and the Kadanoff scaling picture*, „Physical Review B“, 4, nr. 9, 1971, pp. 3174–3183; *II. Phase-space cell analysis of critical behavior*, „Physical Review B“, 4, nr. 9, 3184, 1971, pp. 3184–3205; *Renormalization group and strong interactions*, „Physical Review D“, 3, 1971, pp. 1818–1846; *Feynman-graph expansion for critical exponents*, „Physical Review Letters“, 28, nr. 9, 1972, pp. 548–551; K.G. Wilson, M.E. Fisher, *Critical exponents in 3.99 dimensions*,

„Physical Review Letters“, 28, nr. 4, 1972, pp. 240–243.

Sticle de spin: introducerea dezordinii

Primele modele de sticle de spin sunt cele propuse în S.F. Edwards, P.W. Anderson, *Theory of spin glasses*, „Journal of Physics F: Metal Physics“, 5 (5), 1975, pp. 965–974 e D. Sherrington, S. Kirkpatrick, *Solvable model of a spin-glass*, „Physical Review Letters“, 35, 1975, pp. 1972–1996.

Contribuțiile mele în domeniu sunt: G. Parisi, *Toward a mean field theory for spin glasses*, „Physics Letters A“, 73, nr. 3, 1979, pp. 203–205; *Infinite number of order parameters for spin-glasses*, „Physical Review Letters“, 43, nr. 23, 1754, 1979, pp. 1754–1756; M. Mézard, G. Parisi, N. Sourlas, G. Toulouse, M. Virasoro, *Nature of the spin-glass phase*, „Physical Review Letters“, 52, nr. 13, 1156, 1984, pp. 1156–1159. Cartea e M. Mézard, G. Parisi, M. Virasoro,

Spin Glass Theory and Beyond: An Introduction to the Replica Method and Its Applications, Singapore: World Scientific Publishing Company 1987.

Aplicații ulterioare în: G. Parisi, F. Zamponi, *Mean-field theory of hard sphere glasses and jamming*, „Reviews of Modern Physics“, 82, nr. 1, 2010, pp. 789–845.

Schimb de metafore între fizică și biologie

Articolul lui A. Sokal, *Transgressing the Boundaries: Toward a Transformative Hermeneutics of Quantum Gravity*, „Social Text“, 46–47, 1996, pp. 217–252, se poate citi în www.jstor.org/stable/466856.

***

Nu aș fi omul de știință care am devenit fără contribuția profesorilor mei, a elevilor, a colegilor cu care am învățat și am lucrat (e de prisos să subliniez că și știința este un fenomen colectiv, un sistem

complex). Pe câțiva i-am amintit în carte; lor și celorlalți pe care ar trebui să-i citez aici, chiar cu riscul de a uita pe vreunul dintre ei, le sunt extrem de recunoscător.